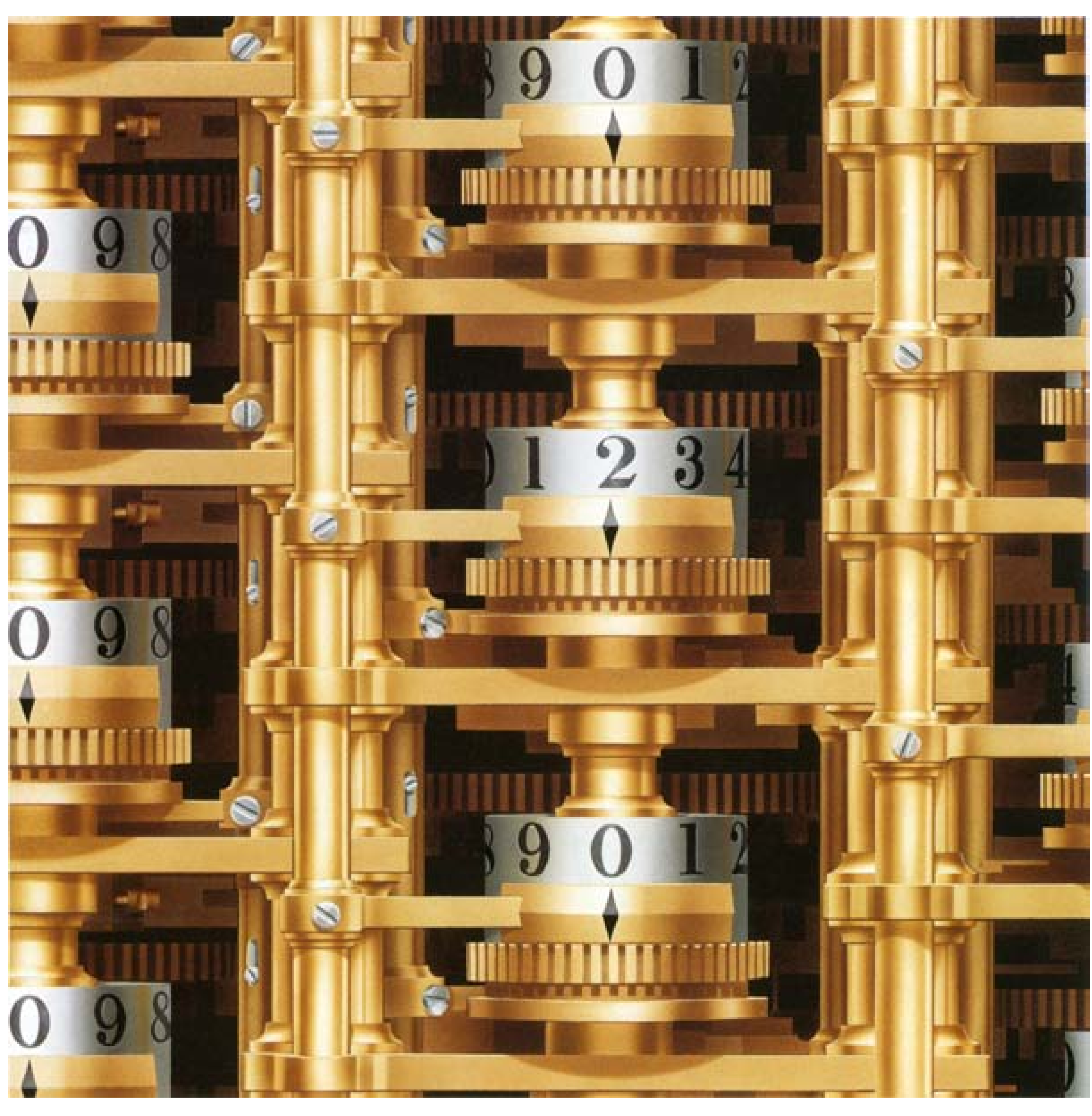
INVESTIGACION y CIENCIA

DEDOS DE CINC Y REGULACION GENICA

LA CORONA DEL SACRO IMPERIO

RADIACION COSMICA DE FONDO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



Copyright © 1993 Prensa Científica S.A.

CALCULADOR DE BABBAGE

ABRIL 1993
700 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

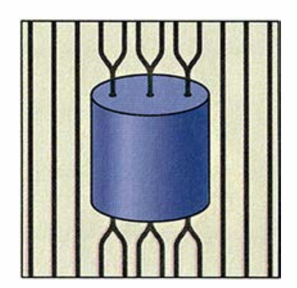


Abril de 1993 Número 199

8 

La corona del Sacro Imperio
Mechthild Schulze Dörrlam

No hay símbolo de soberanía más importante de los que, a un tiempo, fueron reyes alemanes y emperadores del Sacro Imperio Romano Germánico que la corona imperial. Pese a tal interés histórico, persistían inciertas y discutidas su procedencia y antigüedad. El empleo de métodos propios de la investigación arqueológica ha aportado una solución.

18 

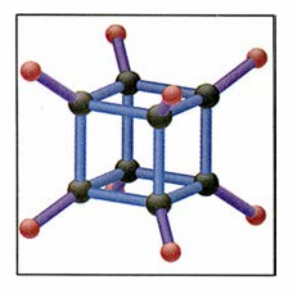
Resistencia de los superconductores de alta temperatura crítica
David J. Bishop, Peter L. Gammel y David A. Huse

El descubrimiento de que ciertas cerámicas conducían la electricidad sin resistencia a temperaturas considerablemente templadas hizo que se vislumbrasen muchas posibles aplicaciones. Pero pronto dejaron estos materiales al descubierto un fallo crítico: en el seno de un campo electromagnético perdían su propiedad superconductora.

26 

Dedos de cinc
Daniela Rhodes y Aaron Klug

Muchos factores de transcripción despliegan pequeñas protuberancias, los dedos de cinc, que reconocen el ADN. Desde su descubrimiento, en 1985, se han identificado proteínas con esas estructuras en muchas especies, desde las levaduras hasta el hombre. Varios laboratorios se aprestan a descifrar los mecanismos que utilizan las proteínas así dotadas.

46 

¿Cómo deberían pensar los químicos?
Roald Hoffmann

Lo mismo las moléculas naturales de la Tierra que las obtenidas en el laboratorio deben su origen a un proceso de síntesis. Cuando los químicos diseñan nuevos compuestos, pueden emular la naturaleza o dejarse guiar por los caprichos de su inteligencia. El autor examina las paradojas a que ello da lugar comparando un antibiótico y un compuesto de hierro.

54 

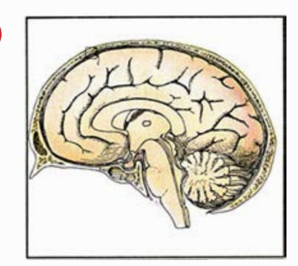
CIENCIA EN IMÁGENES

Técnica y arte cinético
George Rickey

El equilibrio de las obras dinámicas de este escultor es prodigioso: el más leve soplo las agita. Las leyes físicas que rigen el péndulo constituyen el fundamento de esa intrincada coreografía de pesos y equilibrios.

Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**

60



Superación de la barrera hematoencefálica
Elaine Tuomanen

La barrera hematoencefálica no es tan impenetrable como parece. Las bacterias causantes de la meningitis la atraviesan sin problemas. Ha sido el estudio del origen de esa grave enfermedad lo que ha llevado a la autora al descubrimiento del proceso.

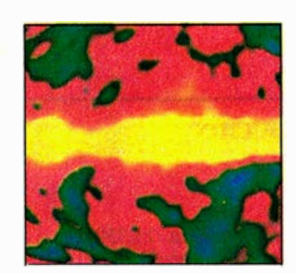
66



La computadora mecánica de Charles Babbage
Doron D. Swade

Los historiadores han sostenido que Charles Babbage fue incapaz de construir sus enormes computadoras mecánicas porque su concepción rebasaba las posibilidades de la ingeniería decimonónica. Un ingenio calculador de tres toneladas de peso, construido en 1991, ha confirmado su viabilidad.

72



Radiación cósmica del fondo de microondas
José L. Sanz y E. Martínez González

Las observaciones realizadas por el satélite COBE respaldan la teoría cosmológica de la gran explosión, al corroborar que el espectro de la radiación del fondo de microondas tiene la misma forma que el de un cuerpo negro a la temperatura de tres grados kelvin.

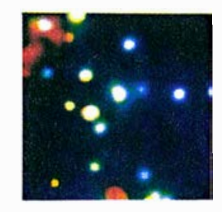
SECCIONES

5 **Hace...**

6 **Cartas**

34 **Perfiles**

36



Ciencia y sociedad

Soles jóvenes.

44 **De cerca**

80 **Ciencia y empresa**

86 **Juegos matemáticos**

Una historia parcialmente verdadera.

90 **Libros**

96 **Apuntes**

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Andrés Sánchez Pascual: *La corona del Sacro Imperio;* Juan Bartolomé Sanjoaquín: *Resistencia de los superconductores de alta temperatura crítica;* Santiago Torres: *Dedos de cinc*; Pere Molera y Mercé Bernaus: *¿Cómo deberían pensar los químicos?;* Luis Bou: *Técnica y arte cinético, La computadora mecánica de Charles Babbage* y *Juegos matemáticos*; Esteban Santiago: *Superación de la barrera hematoencefálica*; J. Vilardell: *Hace...*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; Shigeko Suzuki: *De cerca*

Ciencia y sociedad:

Francisco Beltrán Lloris, Juan P. Adrados, Blai Sanahuja, Xavier Estivill y Assumpció Bosch, Ana M.ª Rubio

Ciencia y empresa:

M. Puigcerver, Ana M.ª Rubio y L. Bou

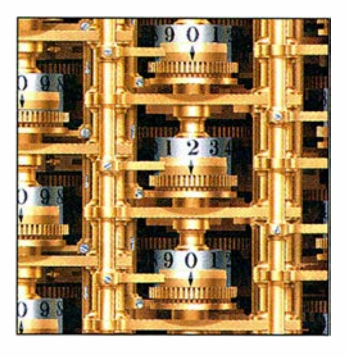
Libros:

L. Carbonell, M. J. Báguena, J. L. Pretus y J.-D. Ros, Luis Alonso y J. L. Amorós

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Portada: George Retseck

Página	Fuente
9	Kunsthistorisches Museum Wien
10	Bildarchiv der Österreichischen
11	Marianne Schulze-Dörrlamm
12-13	Kunsthistorisches Museum Wien
14-15	Marianne Schulze-Dörrlamm
16-17	Kunsthistorisches Museum Wien
19	David J. Bishop y Carlos A. Durán, Laboratorios AT&T Bell
20	Jared Schneidman/JSD
21	J. Schneidman/JSD (*arriba*) y D. Bishop (*centro y abajo*)
22	J. Schneidman/JSD
23	J. Schneidman/JSD (*izda.*) y D. Bishop (*dcha.*)
24	J. Schneidman/JSD (*izda.*), Robert Prochnow (*dcha.*)
25	J. Schneidman/JSD
27	Kirk Moldoff
28	Guilbert Gates/JSD
29	David Neuhaus (*izquierda*), Daniela Rhodes, MRC (*derecha*)
30	Guilbert Gates/JSD
31	Gabor Kiss
32	Guilbert Gates/JSD
33	John W. R. Schwabe y Daniela Rhodes, MRC
47	Art Resource, Inc.
48-49	Boris Starosta; Ralph Mosley/Merck & Co. (*recuadros*)
50-51	Kingsley L. Taft, MIT
52-53	Boris Starosta
54-57	Christopher Burke, Quesada/Burke; Jana Brenning (*dibujos*)
58	Achim Pahle (*arriba*), Peter Hollenbach, Christoph & Mayer (*abajo*)
59	Christopher Burke, Quesada/Burke (*izquierda y abajo*), TGL (*arriba, derecha*)
60-61	Carol Donner
62	Ian Worpole (*arriba*), Elaine Tuomanen (*abajo*)
63	Carol Donner
64	Yoav Levy/Phototake, Inc. (*izda.*), Johnny Johnson (*dcha.*)
66-69	Doron D. Swade (David Exton/ Science Museum Photostudio)
70	Johnny Johnson
71	Doron D. Swade (David Exton/ Science Museum Photostudio)
73	M. Geller y J. Huchra
74	A. Aragón, J. L. Sanz y E. Martínez
75-76	S. Maddox *et alii* (*arriba*); A. Aragón, J. L. Sanz y E. Martínez (*abajo*)
77-78	G. Smoot
86	Patrick Grim (*izquierda*), Jared Schneidman/JSD (*derecha*)



LA PORTADA expone un detalle de la sección ensamblada del Ingenio de diferencias n.º 1, calculadora automática proyectada por Charles Babbage en los años veinte del siglo pasado. Aunque los proyectos de Babbage sobre calculadoras y computadoras mecánicas dejaron expedito el camino para la moderna revolución informática, no consiguió jamás acabar ninguno de sus ingenios. Una reconstrucción moderna de una de sus calculadoras demuestra que sus diseños eran correctos en el plano de la lógica y realizables en la práctica (véase "La computadora mecánica de Charles Babbage", por Doron D. Swade, en este número).

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
Juan Pedro Campos
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
M.ª Cruz Iglesias Capón
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Alan Hall, *Executive Editor*; Michelle Press, *Managing Editor*; Timothy M. Beardsley; Elizabeth Corcoran; Deborah Erickson; Marguerite Holloway; John Horgan, *Senior Writer*; Philip Morrison, *Book Editor*; Corey S. Powell; John Rennie; Philip E. Ross; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CHAIRMAN OF THE BOARD Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	7.700	14.000
Extranjero	8.400	15.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 700 pesetas
Extraordinario: 900 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA

Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



Copyright © 1993 Scientific American Inc., 415 Madison Av., New York N. Y. 10017.

Copyright © 1993 Prensa Científica S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona (España)

Reservados todos los derechos. Prohibida la reproducción en todo o en parte por ningún medio mecánico, fotográfico o electrónico, así como cualquier clase de copia, reproducción, registro o transmisión para uso público o privado, sin la previa autorización escrita del editor de la revista. El nombre y la marca comercial SCIENTIFIC AMERICAN, así como el logotipo correspondiente, son propiedad exclusiva de Scientific American, Inc., con cuya licencia se utilizan aquí.

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 - 08907 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

... cincuenta años

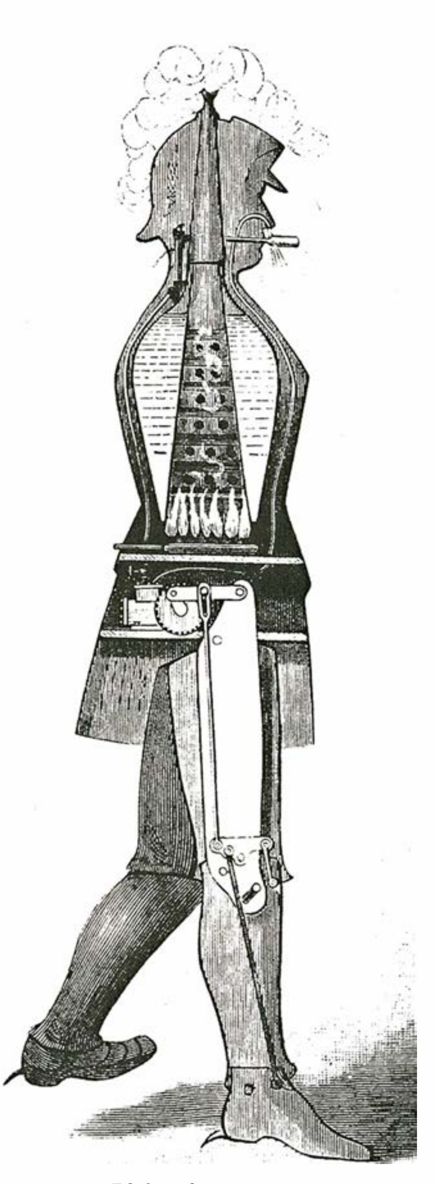
SCIENTIFIC AMERICAN: «Se ha dado con una versión moderna del temple del acero para espadas que los famosos armeros de Damasco descubrieron y con el que conseguían que se doblase sin romperse; eso sí, sin los sufrimientos humanos que el antiguo método conllevaba. En éste, la sangre humana era el "aceite que templa". Los técnicos de la Compañía de Investigación y Desarrollo de la Gulf llegaron a la conclusión de que el revenido tenía que ver más con los tejidos del cuerpo que con la sangre en sí. Sabían, sin embargo, que la materia orgánica de la sangre está formada por macromoléculas, y aplicaron eficazmente este conocimiento en los experimentos que condujeron al desarrollo del Super-Quench, el aceite que supertempla. »

«La cuestión de si las tuberías de plomo en las redes domésticas de agua pueden ser nocivas para la salud no está definitivamente zanjada. He aquí la respuesta que *The Journal of the American Medical Association* da a un médico: 'La cantidad de plomo que absorben la mayoría de las aguas es casi despreciable. En las tuberías de plomo se forma un revestimiento de sales insolubles que inhiben la disolución del metal. Sólo cuando el agua de suministro es ácida, el plomo se torna potencialmente peligroso por culpa de los ácidos orgánicos. Puede disolverse también cuando en la instalación de fontanería se emplean metales diferentes y se produce galvanización.»

«Según el profesor Harry N. Holmes, del Oberlin College, presidente de la Sociedad Química Americana, los soldados, en ciertas condiciones, y los obreros expuestos a sustancias industriales nocivas necesitan un suplemento de vitamina C. Esta, que es destruida por las infecciones y por un conjunto de contaminantes de naturaleza industrial, se pierde también, según señala, en cantidades apreciables cuando se suda intensamente. Informa el profesor que una de las compañías fabricantes de caucho más importantes dio diariamente vitamina C a 100 trabajadores expuestos a la concentración de vapores de benceno y tolueno, que supuestamente no era peligrosa, del aire de la planta. Al cabo de poco tiempo, afirma, 37 de los trabajadores se sentían 'menos cansados' al final de la jornada, 10 se sentían mejor en general y sólo 31 no informaron de mejorías.»

... cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «El profesor Hertz ha demostrado que los rayos procedentes del cátodo de un tubo de Geissler, capaces de excitar la fosforescencia, atraviesan las láminas de metal finas. Si fuese factible dar con una hoja de pan metálico lo bastante gruesa para que resultara estanca al aire y opaca, aunque lo bastante fina para que fuera permeable a dicha descarga, sería posible que esos rayos encontrasen un camino hacia la atmósfera cerrando con un trozo de semejante pan metálico una abertura practicada en el tubo de descarga. La idea la ha llevado a cabo el profesor Philip Lenard, ayudante del profesor Hertz. Una placa de aluminio batida de 0,003 mm de grueso forma un obturador que el doctor Lenard llama "ventana", porque permite que la traspasen libremente los rayos procedentes de un cátodo situado a 12 cm. Entonces, si junto a esa ventana se colocan sustancias con propiedades fosforescentes, brillarán con su peculiar luz por la cara más cercana a ella.»



El hombre a vapor

«Pregunta M. M. B.: Si se dejase caer una bola por un agujero que atravesara la Tierra de parte a parte, ¿se pararía al llegar al centro o pasaría de largo? Yo sostengo que se pararía, y quisiera disponer de un argumento que lo demuestre. R.: Muy a duras penas llegaría la bola al centro. Su velocidad circunferencial, debida a la rotación de la Tierra en torno a su propio eje, la mantendría pegada al costado oriental del agujero, salvo que éste coincidiera con el eje polar, en cuyo caso oscilaría en vaivén durante un tiempo hasta que el rozamiento la asentara en el centro.»

«Hace unos años, en Nueva York, se hizo gran publicidad y alarde de lo que, según se pretendía, era un hombre a vapor. Hasta hace poco, podían aún verse los restos del ejemplar en cuestión en una de las tiendas de trastos viejos del centro. No han pasado siquiera dos años que otro inventor puso de nuevo en pie el proyecto, y ahora un auténtico hombre a vapor ha sido exhibido en esta ciudad y en otros lugares. Su creador es el profesor George Moore, natural de Canadá. Este hombre a vapor parece ser un nativo americano. En la ilustración mostramos la sección y una vista general. Dentro del cuerpo está la caldera, alimentada por un quemador de gasolina. Bajo la caldera está situado el motor. Este, aunque de poco tamaño, funciona a gran velocidad, dando hasta 3000, o más, revoluciones por minuto y desarrollando una potencia de 1/2 caballo, aproximadamente. Se dice que ni siquiera dos hombres que tirasen hacia atrás del artefacto, de más de un metro ochenta de alto, podrían hacer que retrocediese.»

Cartas

Señor director:

En su artículo, de ecuánime objetividad, "Cerebro de varón y cerebro de mujer" aparecido en el número de *Investigación y Ciencia* de noviembre del año pasado, Doreen Kimura no ayuda a desechar algún mito todavía asentado. La opinión tradicional de que el patrón femenino de organización neuronal se produce por falta de exposición a niveles masculinizantes de testosterona y estradiol debería desecharse definitivamente. La feminización de la estructura y del funcionamiento neuronales es un proceso activo. Numerosos estudios en roedores han demostrado que la feminización depende de niveles de estrógeno demasiado bajos como para provocar la masculinización. El dogma de que las proteínas del plasma fijadoras de estrógeno, tales como la alfa-fetoproteína (AFP), "protegen" de la masculinización al cerebro hembra es erróneo. En los roedores, es mucho más probable que la AFP actúe como una reserva de estrógeno, que puede emplearse para iniciar el desarrollo de los axones y las dendritas. El estrógeno, por consiguiente, tal vez regule la diferenciación sexual tanto en los cerebros masculinos como en los femeninos.

C. Dominique Toran-Allerand
Departamento de Anatomía
y Biología Celular
de la Universidad de Cornell

Kimura pretende que muchas de las diferencias entre las capacidades del hombre y las de la mujer se hallan mediatizadas por la diferente organización de sus cerebros. Sin embargo, dos de los ejemplos que ella aduce se pueden explicar por simples distinciones físicas. Algunos experimentos han probado que la superior habilidad de la mujer en el manejo de clavijas o teclas desaparece en cuanto se tiene en cuenta la mayor longitud de los dedos del hombre. Está más que demostrado que en los ejercicios de tiro los errores de índole espacial y temporal disminuyen a medida que la fuerza que impulsa al proyectil se aproxima a un máximo. La mayor fortaleza de los hombres ha de garantizarles una ventaja en tales tareas. Las diferencias que en las habilidades de lanzar proyectiles se advierten entre los niños y las niñas prepúberes, cuando las fuerzas son parecidas en los dos sexos, quizá se deban al influjo de la socialización.

John S. Raglin
Departamento de Quinesiología
Universidad de Indiana

No todos los científicos admiten con Kimura que haya una razón biológica de la segregación ocupacional por sexos. Kimura dice que la diferencia entre sexos en lo tocante a puntería expresa una desviación típica de 0,75, y apostilla que es grande; sin embargo, esa desviación estándar es de dos por lo que se refiere a la altura. La mayor diferencia cognitiva es la relativa a la visualización espacial, 0,7, por tanto, ni una cuarta parte de la diferencia en talla. En la hipótesis extrema de que el éxito como físico o ingeniero dependiese sólo de la capacidad de visualización espacial que se tuviese, cabría esperar que el 60 por ciento de las personas que se dedicasen a esas actividades fuesen hombres, pero en la realidad el porcentaje es del 90. Si ese éxito requiriese que se estuviese entre el 5 por cierto más dotado, no pasaría del 70. Esas predicciones asumen que la diferencia entre sexos está determinada exclusivamente por factores que no pueden ser modificados por la socialización o la educación, lo cual no es verdad. Difícil sería explicar en tal caso que antes la enseñanza y el secretariado fuesen trabajos básicamente masculinos.

Melissa Hines
Departamento de Psiquiatría
de la Universidad de California en
Los Angeles

Contestación de Kimura:

Toran-Allerand se refiere a una idea válida que, por mor de la brevedad, hube de omitir en mi artículo. Debe añadirse que es todavía discutible que las pruebas en favor de tal influencia sobre la organización del comportamiento reproductivo se hayan de dar por concluyentes.

Raglin sugiere que las diferencias de los sexos en el comportamiento motor son reducibles a diferencias de la configuración corpórea. Aun cuando estas diferencias fuesen las decisivas, cabría creer que hubiese otras paralelas a ellas en el plano neuronal. Las diferencias entre las fuerzas de los niños y las niñas de tres años de edad son ciertamente mínimas, pero se ha demostrado que los niños afinan más la puntería cuando se trata de alcanzar dianas. De todos los datos que se tienen parece razonable inferir que, aparte de las consideraciones de tamaño, rapidez y fuerza, los cerebros de las mujeres tienen un mejor control de los dedos y los de los hombres están más dotados para apuntar y atinar respondiendo a estímulos externos.

En cuanto a Hines, estoy de acuerdo en que son complejas las causas de las diferencias ocupacionales entre hombres y mujeres. Sin embargo, mi tesis de que, habida cuenta de la predisposición biológica, no habría que esperar que hombres y mujeres estuviesen *igualmente* representados en todas las ocupaciones es, creo yo, una opinión moderada que comparten la mayoría de los biólogos que trabajan en este campo (la mayor parte de los cuales son mujeres). Las diferencias entre hombres y mujeres en visualización espacial van del 0,70 al 1,0; en el razonamiento matemático rondan el 0,50.

Aun en este último caso la proporción de hombres a mujeres en el extremo superior de la escala distributiva es muy elevada, y lo significativo para ciertas profesiones es la diferenciación en el extremo superior. Según un estudio reciente, muchachas que sacan nota muy alta en matemáticas tienden también a tener intereses y valores que las hacen aún más idóneas en dedicaciones no científicas. Esos valores no vienen necesariamente determinados por la socialización. La común inferencia de que a las mujeres las mantiene alejadas de los quehaceres científicos una discriminación sistemática o deliberada no se basa en pruebas que la respalden. Podría argüirse igualmente que a los hombres se les aparta, por discriminación, del oficio de niñeras. Más bien salta a la vista que el proceso consiste en la autoselección.

La corona del Sacro Imperio

Pese a su importancia histórica, inciertas y discutidas eran su procedencia y su antigüedad. El empleo de métodos propios de la investigación arqueológica ha aportado una solución

Mechthild Schulze-Dörrlam

No hay símbolo de soberanía más importante de los que, a un tiempo, fueron reyes alemanes y emperadores del Sacro Imperio Romano Germánico que la corona imperial. Vino el Sacro Imperio, fundado por la unión imperial de Carlomagno (747 a 814; rey de los francos desde el 768, emperador desde el 800), a suceder al romano de Occidente de finales de la Antigüedad, en competencia con el imperio de Bizancio, el viejo imperio romano de Oriente. Tras la disgregación del reino franco, los reyes de su parte oriental, cuya elección se celebraba en el *regnum* alemán, se convirtieron en los renovadores de aquella unión.

Bajo el primer emperador salio, Conrado II, que gobernó de 1024 a 1039, el Imperio abarcaba los *regna* de Alemania y de Italia y, a partir de 1032, también el *regnum* de Borgoña. Para entroncar con el Imperio romano de la Antigüedad tomó el nombre de *Romanum Imperium*, completado en 1254 con la adición de *Sacrum*, quedando así *Sacrum Romanum Imperium*. Ya en la Baja Edad Media había quedado reducido a Alemania y a los restos de los otros dos *regna*, Italia y Borgoña. El añadido oficial *Nationis Germanicae* (de la Nación Germánica) aparece más tarde y dura desde el siglo XV hasta mediados del XVI. El Sacro Imperio Romano finalizó cuando, a instancias de Napoleón I Bonaparte, que desde 1804 era emperador de los franceses, Francisco II de Habsburgo renunció el 6 de agosto de 1806 a la dignidad imperial y, con ello, también a la corona imperial. Esta se conserva hoy en la cámara del tesoro del palacio imperial de Viena.

Durante la Baja Edad Media y los comienzos de la Edad Moderna la corona imperial no fue utilizada ciertamente en todas las coronaciones imperiales; a menudo se la usaba tan sólo en las coronaciones reales. Eso no impedía, sin embargo, que continuara siendo el símbolo del *Imperium.* Tal insignia de soberanía indicaba que quien la ceñía era sucesor de los emperadores del Imperio romano de Occidente de finales de la Antigüedad y lo situaba, en consecuencia, por encima no sólo de todos los grandes del país, sino también de todos los otros monarcas de Europa occidental.

Síntesis del Imperio y de la dignidad imperial, la palabra "corona" pudo ser utilizada incluso, como mínimo desde comienzos del siglo XII, para significar "el Imperio". Eso trajo consigo que tal insignia alemana de coronación alcanzara un sentido que nunca llegaron a poseer las diversas coronas del emperador de Bizancio.

El hecho de que desde hace decenios los eruditos vengan discutiendo con ardor la cuestión de la antigüedad y la procedencia de esta corona se debe sin duda al rango tan elevado que posee. Desde el siglo XIV hasta bien entrado el siglo XIX se creyó que la corona imperial era la corona de Carlomagno. Desde finales del siglo pasado, con la aparición de una historia del arte basada en fundamentos científicos, la corona fue atribuida en primer lugar a Conrado II. La cimera en forma de arco que va sujeta en la parte superior de la corona lleva una inscripción en la que aparece en efecto el nombre de un emperador Conrado. Ese nombre puede ser relacionado, por razones estilísticas e históricas, con el primer monarca salio. Así, por ejemplo, sólo él fue coronado (en el año 1027) emperador, mientras que sus homónimos, Conrado I, de la casa de los Conradino, que gobernó de 911 a 918, y Conrado III, de la casa de los Staufen, que gobernó de 1138 a 1152, nunca alcanzaron la dignidad imperial. Desde hace varios decenios se sospecha, sin embargo, que tanto el aro octogonal de la corona, compuesto de ocho placas de oro redondeadas en su parte superior, como la cruz frontal que va sujeta a ese aro son bastante más antiguos que la cimera. Las diferencias que hay en el número de quilates del oro, en el grosor de las perlas ensartadas y en el estilo de la decoración indican ciertamente que los tres elementos de que se compone la corona imperial no salieron de las mismas manos y que, por ello, también pudieron ser fabricados en fechas distintas. Pero, ¿en cuáles?

Opiniones encontradas

El problema se complica todavía más por el hecho de que existe una tradición histórica según la cual Conrado II regaló al monasterio de Cluny, situado en Borgoña y uno de los más importantes centros reformadores del monacato occidental, las insignias con que fue coronado emperador en Roma, aunque la tradición no especifica cuáles fueron esas insignias. A su vez, Conrado II heredó en 1032 la corona real de Borgoña, con la que fue coronado un año después como soberano de ese reino. ¿Era acaso la corona real de Borgoña el aro de la corona imperial que heredaron los sucesores de Conrado II?

MECHTHILD SCHULZE-DÖRRLAM es conservadora principal de la sección altomedieval del Museo Central Romano-Germánico, Instituto de Investigación de Prehistoria y Protohistoria de Maguncia. Estudió prehistoria y protohistoria, historia del arte e historia medieval, y se doctoró en 1971 en la universidad de Bochum con una tesis sobre la decoración de las fíbulas germánicas del Bajo Imperio. El núcleo de sus investigaciones lo constituyen la datación e interpretación histórica de los hallazgos arqueológicos.



1. LA CORONA del Sacro Imperio Romano (*arriba*) consta de un aro de 22 centímetros de circunferencia formado por ocho placas de oro unidas por charnelas, así como de una cruz frontal y de una cimera en forma de arco (*abajo*). Estas dos últimas piezas están sujetas al aro. Originalmente resultaba posible desmontar la corona desabrochando las charnelas. Hoy esto no puede hacerse, pues más tarde se fijaron unas láminas de hierro en la cara interior de la corona. Tanto las dos grandes placas de la frente y la nuca como las dos laterales de las sienes, están cubiertas de piedras preciosas —zafiros, amatistas, esmeraldas y rubíes— y de perlas y adornos de oro. Las cuatro placas de las esquinas tienen tan sólo una orla de zafiros y perlas, pero llevan una placa esmaltada cada una. En esos esmaltes están representados David, Salomón, Ezequías con el profeta Isaías y Cristo como pantocrátor. En los tres tubitos de oro parecidos a varillas de abanico que se encuentran en lo alto de la cara interior de las placas de las sienes es probable que estuvieran sujetos en otros tiempo unos “lirios” hechos de perlas y piedras preciosas, semejantes a los que conocemos por pinturas de la Alta Edad Media y también por dos coronas reales de la época de los Otones. La cimera lleva la inscripción, realizada con hilos de perlas ensartadas, CHVONRADVS DEI GRATIA ROMANORV(m) IMPERATOR AVG (vstvs): Conrado, augusto emperador de los romanos por la gracia de Dios.

De la Alta Edad Media no nos quedan descripciones detalladas, tampoco representaciones pictóricas exactas, de la corona imperial. Ello ha llevado a numerosos historiadores a tratar de encontrar en las fuentes escritas indicaciones de motivos que hicieran necesario confeccionar su aro como se hizo. Los historiadores del arte, por su parte, han intentado averiguar su antigüedad y el lugar de donde procede mediante análisis de su estilo. Otros investigadores han creído poder determinar el momento en que fue fabricada la corona mediante una interpretación de las ideas político-espirituales que se expresan, según su opinión, en la forma que tiene, en el número simbólico de perlas y piedras preciosas que lleva y en las figuras de los reyes veterotestamentarios: David, Salomón y Ezequías. Los resultados obtenidos han sido, empero, tan contradictorios que en el siglo XX se ha atribuido la corona imperial a cinco soberanos distintos, todos ellos anteriores a Conrado II. Se la ha atribuido, en efecto, a Otón I el Grande (rey desde el año 936, emperador de 962 a 973), a su hijo Otón II (rey desde el año 961, asociado por su padre al gobierno del Imperio desde el año 967 y soberano único de 973 a 983), a Otón III (rey desde el año 983, emperador de 996 a 1002), a Enrique II (rey desde el año 1002, emperador de 1014 a 1024), y, por fin, al rey Rodolfo de Borgoña (que gobernó de 993 a 1032). Recientemente se ha defendido incluso que la corona imperial fue construida para la coronación como rey de Conrado III (que gobernó de 1138 a 1152).

Desde comienzos de los años cincuenta ha venido creyéndose que el aro de la corona era una obra de la orfebrería otoniana. Para ello resultó decisiva una investigación sobre su estilo realizada en 1953 por Hermann Fillitz, historiador vienés del arte. En esa investigación su autor hacía hincapié en el parentesco, grande según él, que existía entre el aro de la corona y otras obras de la orfebrería otoniana, en especial con la cruz antigua de la abadesa Matilde, perteneciente al tesoro de la catedral de Essen. Esa cruz fue construida entre los años 973 y 982. Hermann Fillitz insinuaba también que cabía sospechar que la corona fuese anterior a esa fecha.

Sólo dos años más tarde, apoyándose en los resultados de Fillitz, Hansmartin Decker-Hauff, del Archivo de Estado de Stuttgart, publicaba



2. LA MAS ANTIGUA representación detallada y fidedigna de la corona imperial de que se tiene noticia se hallaba en una pintura mural, terminada en 1360, del alcázar del castillo de Karlstein, cerca de Praga. Esa pintura la conocemos tan sólo por una miniatura del siglo XVI. Mostraba el árbol genealógico de Carlos IV, emperador de 1355 a 1378, y en él, a Carlomagno con la corona imperial (hasta bien entrado el siglo XIX se pensó que la corona imperial era la corona de Carlomagno). De las placas de las sienes colgaban entonces a una y otra parte dos listas franjeadas, insignia de la dignidad imperial; estas listas franjeadas no se han conservado. Las hubo, sin embargo, y la prueba está en las tres corchetas de oro batido existentes en el borde inferior de las placas correspondientes a las sienes.

en colaboración con Percy Ernst Schramm, historiador de Göttingen, un trabajo cuya tesis era que el aro de la corona tuvo que ser confeccionado ya para la coronación imperial de Otón I, ceremonia que se celebró en Roma. Aparte de otras razones, Hansmartin Decker-Hauff deducía su tesis de unas palabras de Liutprando de Cremona, que vivió aproximadamente de 920 a 972, fue obispo de esa ciudad del sur de Lombardía y biógrafo de Otón I. Liutprando de Cremona escribió que Otón I se presentó a su coronación ... *miro ornatu novoque apparatu*, es decir, con unas vestimentas admirables y una pompa nueva. Según Decker-Hauff el citado obispo habría querido referirse con esas palabras a las insignias de soberanía provistas de un significado simbólico-político y, de manera especial, a la corona.

Decker-Hauff afirma que las doce grandes piedras preciosas que se encuentran en las placas del aro de la frente y de la nuca son símbolos de las 12 tribus de Israel y corresponden al *choschen* (una placa con doce piedras preciosas que el Sumo Sacerdote llevaba en su pecho), y que la corona es la expresión de la concepción político-estatal de Otón I, el cual se habría considerado a sí mismo como rey y, a la vez, como sumo sacerdote.

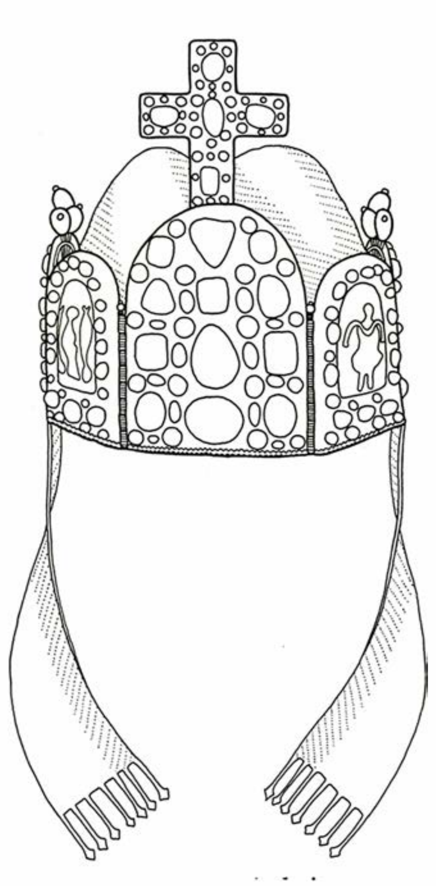
Veinte años más tarde Reinhart Staats, teólogo e historiador de la Iglesia de la Universidad de Kiel, veía, por el contrario, en las figuras de los reyes David y Salomón una alusión al hecho de que Otón I hubiese asociado al gobierno del Imperio a su hijo y sucesor Otón II. Staats creía, por tanto, que la corona había sido construida para la coronación imperial de Otón II en el año 967. Los escritores de los años sesenta del siglo X, recordaba Staats, habían ensalzado a ambos emperadores como reencarnaciones de David y Salomón. También Herwig Wolfram, historiador vienés, afirmaba en 1970 que la figura del rey Ezequías con el profeta Isaías representaba una alusión a Otón I el Grande. El rey veterotestamentario estuvo enfermo de muerte, pero fue sanado por la gracia de Dios y pudo así continuar gobernando durante 15 años más. Y también Otón I estuvo a punto de fallecer en el año 958 a consecuencia de una grave enfermedad, pero, curado de ella, gobernó otros 15 años. Dado que Otón I no pudo prever el año en que moriría, el 973, Wolfram sacaba la conclusión de que no fue Otón I, sino su hijo Otón II el que, tras el fallecimiento de su padre, encargó la corona. Según Wolfram la fecha más antigua que podría tomarse en consideración sería el año 980, pues dos años antes el rey Lotario, soberano del reino franco occidental, que gobernó de 954 a 986, robó todas las insignias que se encontraban en el palacio imperial de Aquisgrán, de las cuales, por cierto, nunca más ha vuelto a saberse.

En contraste con lo dicho por los autores citados hasta aquí, Helmut Trnek, historiador vienés del arte, ha subrayado hace poco el sentido puramente cristológico de las figuras que aparecen en la corona. Según él esas figuras estaban destinadas a recordar al emperador las más importantes virtudes del soberano cristiano. Trnek no ve tampoco en tales figuras una alusión a un determinado acontecimiento político de la época y advierte del peligro de que con interpretaciones mítico-alegóricas se adjudiquen a ellas pensamientos y motivos que no existían en la época en que se construyó la corona.

Indicios en favor de Conrado II

Esta breve selección de argumentaciones contradictorias entre sí pone de manifiesto que los métodos utilizados hasta ahora para determinar la fecha exacta en que fue construido el aro de la corona no eran los apropiados. Podrán las distintas argumentaciones aparecer plausibles, pero a la postre carecen de la fuerza probatoria capaz de poner punto final a la discusión. Resulta sorprendente, por otro lado, que hasta el momento no se hayan tenido en cuenta las objeciones críticas formuladas por algunos historiadores del arte e historiadores en general en contra de la datación propuesta para el aro de la corona: alrededor del año 980 o antes de esa fecha.

Esto es lo que me ha llevado a realizar, en el marco de los trabajos preparatorios de una exposición sobre los Salios, una investigación en la que se utilizasen los métodos que están bien acreditados y que son usuales desde hace tiempo en la determinación de la antigüedad y procedencia de los hallazgos arqueológicos. Eso implica averiguar primero, recurriendo exclusivamente a un análisis completo de la forma y de los detalles y a su comparación con otros objetos bien datados, el período a que un objeto concreto corresponde, y sólo después intentar relacionarlo con determinados acontecimientos históricos e interpretar su sentido.



3. ESTE DIBUJO proporciona una idea del aspecto que ofrecía originalmente la corona imperial en tiempos del emperador Conrado II. Las dos placas correspondientes a las sienes llevaban aún en lo alto unos adornos en forma de "lirios", hechos de perlas y piedras preciosas. De esas mismas placas colgaban unas listas franjeadas, insignia de la dignidad imperial. Dichas listas diferenciaban a la corona imperial alemana de la corona del emperador bizantino, pues de esta última pendían largos hilos de perlas.

Aquí "análisis completo" significa investigar la antigüedad y procedencia de todos los detalles decorativos y no sólo de algunos especialmente elegidos. Lo que yo he hecho en primer lugar ha sido, en consecuencia, registrar todos los varios elementos ornamentales que se encuentran en las caras externas e internas de las ocho placas de la corona —los más de esos elementos están en la placa correspondiente a la frente— y luego he ido comparando en qué otros trabajos de orfebrería desde el siglo IX hasta finales del siglo XI, datables con total seguridad o de manera suficientemente segura, aparecen también esos mismos elementos (en algunos casos se han utilizado las dataciones revisadas recientemente). Por vez primera se han incluido hallazgos arqueológicos que hasta ahora se tenían poco en cuenta o descubiertos no hace mucho.





4. EN UNA DE LAS PLACAS del aro de la corona se encuentra un esmalte en que aparece la figura del rey Salomón (*a la izquierda*). El rey lleva una corona achatada con cimera, una túnica ceñida que le llega hasta las rodillas, y un largo manto que va sujeto con una fíbula en el hombro izquierdo. En el borde de la parte delantera del manto llama la atención una aplicación de tela, rectangular y de color diferente (*aquí de color azul*), que es parecida al *tablion* que portaban en su manto los oficiales del ejército bizantino. Se trata de un detalle importante, que indica que ese esmalte sólo pudo ser fabricado por un orfebre procedente de tierras meridionales, probablemente de Italia, ya que, a diferencia de los artistas mediterráneos, los artistas alemanes de la Alta Edad Media no solían representar mantos de esa clase. Tanto de la corona achatada del rey Salomón como de las coronas de los otros dos reyes del Antiguo Testamento penden también unas listas. Representaciones de coronas con tales listas colgantes se encuentran por vez primera en figuras de la época de Enrique II (1002 a 1024). Son por ello pruebas importantes de que los esmaltes de las placas de la corona, y por tanto el aro entero, no pueden ser del siglo X, sino de comienzos del siglo XI. Delante del rey Ezequías (*a la derecha*), que aparece sentado en su trono, está el profeta Isaías mostrando un listón. Las palabras que en él se hallan son: ECCE ADICIAM SVPER DIES TVOS XV ANNOS (añadiré quince años a los días de tu vida). Ninguna razón concluyente obliga, sin embargo, a suponer que esas palabras constituyesen una alusión a la suerte personal del emperador Otón I, en especial a la grave enfermedad que sufrió en el año 958, después de la cual gobernó, igual que Ezequías, otros 15 años más. Lo que esa figura pretendía era más bien exhortar a todos los emperadores a que confiasen en la gracia de Dios. Lo mismo puede decirse de las demás figuras, que recuerdan las otras tres virtudes importantes de un soberano cristiano: la sabiduría, la justicia y el temor de Dios.

Mediante lo que se llama una "tabla combinatoria", en la que los objetos van listados por orden cronológico, todos ellos han sido comparados con los elementos ornamentales del aro de la corona. Tal operación ha demostrado que no cabe afirmar que exista una similitud especialmente grande entre la corona imperial y obras de la orfebrería otoniana anteriores al año 1000; en especial no cabe afirmar que se dé tal similitud con la cruz antigua de la abadesa Matilde, perteneciente al tesoro de la catedral de Essen, cosa en la que tanto insistió Fillitz y en la que se basó para asignar una fecha tan temprana al aro. Sólo raras veces los citados trabajos de la orfebrería otoniana tienen en común más de un detalle con las placas de la corona. En cambio son mayores las coincidencias (de tres a siete detalles característicos) entre la corona imperial y trabajos de orfebrería tanto de tiempos de Enrique II y Conrado II como de los primeros años de gobierno de Enrique III. Tales correlaciones demuestran que el aro de la corona, pese a tener algunas formas ornamentales bastante vetustas, no pudo ser fabricado ya en el siglo X, sino sólo a comienzos del siglo XI. Algunos ejemplos lo aclararán.

Uno de los elementos ornamentales antiguos son las perlas guarnecidas por un ancho anillo de hilo de perlas; un hilo liso de oro que atraviesa las perlas y cuyos extremos están soldados a dicho anillo las mantiene como suspensas en el engaste abierto. Esta manera de sujetar

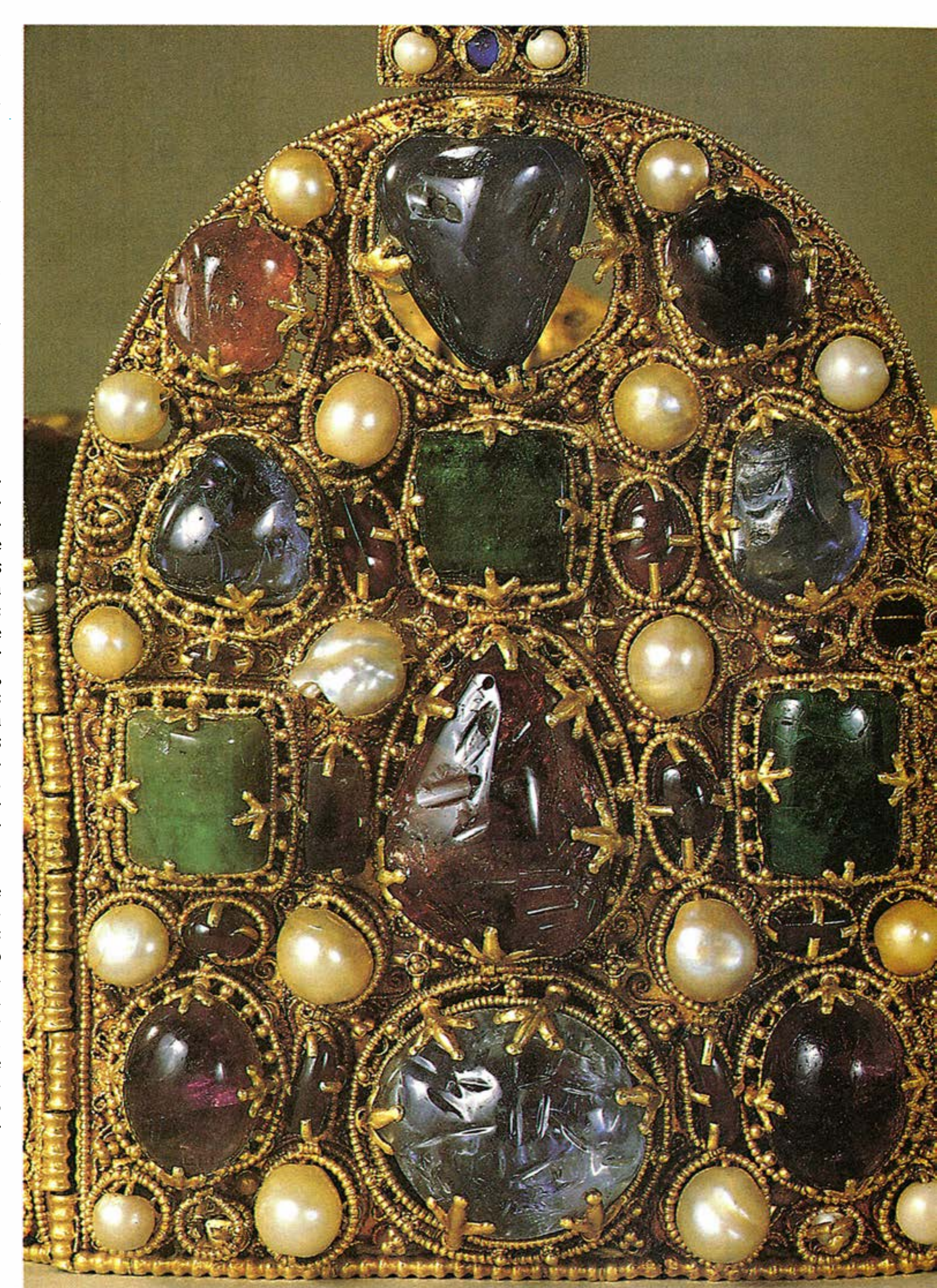
un objeto se utilizó corrientemente en el área mediterránea desde finales de la Antigüedad hasta bien entrada la Alta Edad Media. Una prueba de ello la tenemos en los pendientes bizantinos en forma de media luna, de la segunda mitad del siglo X, mencionados en la columna 6 de la tabla combinatoria. En Alemania, sin embargo, no es posible encontrar tales engastes de las perlas hasta los trabajos de orfebrería de la época en que gobernó el emperador Enrique II (1002 a 1024), de modo que las placas del aro de la corona imperial no pueden ser anteriores al año 1000.

Las sujeciones mediante garras de tres dedos libres, es decir, no soldadas a un engaste de oro batido, no aparecen tampoco en Alemania hasta después del año 1000, en concreto en la cruz de la emperatriz Gisela, construida hacia el año 1006 y que se encuentra en Munich. Y en la combinación típica de las piedras preciosas de las placas de la corona imperial, esto es, en combinación con bolas de oro gruesas y libres, las garras de oro sólo aparecen en trabajos de orfebrería de la época temprana de los Salios, a saber: en las dos fíbulas de oro de Minden y de Schleswig, así como en la cruz frontal de la corona imperial, la cual se encuentra, por lo que respecta a su estilo, entre las placas de la corona y la cruz imperial de Conrado II. Esta se guarda, como la corona, en la cámara del tesoro del palacio imperial de Viena; tiene 77 centímetros de alto, y en su parte delantera está cubierta por piedras preciosas, perlas, zarcillos de filigrana y adornos de oro. Son en ella características las apretadas filas de perlas ensartadas que hay en sus brazos.

Las bolas de oro libres aparecen en Alemania por primera vez a comienzos del período salio, y lo mismo ocurre con las piedras preciosas sujetas por sencillas garras de oro a su engaste de perlas ensartadas.

Dado que, por principio, sólo los elementos ornamentales más recientes son determinantes para la datación, sin duda el aro de la corona no fue construido ya para Enrique II, sino para Conrado II. No puede aceptarse, en cambio, una fecha muy posterior —como la de la coronación real de Conrado III en el año 1138, cosa que ha sido propuesta por el jurista muniqués Hans Constantin Faussner—, en razón de que numerosos elementos decorativos, sobre todo las combinaciones de formas ornamentales características, no pueden encontrarse ya en los trabajos de la primera mitad del siglo XII.

Conrado II fue coronado rey cuatro días después de ser elegido para ello en Maguncia en 1024, por lo que cabe suponer que hizo construir el aro de la corona imperial para su coronación como emperador en Roma en el año 1027. Durante la ceremonia, o acaso algún tiempo después, fue fijada en la corona la cimera. Y como último elemento se añadió, hacia 1030, la cruz frontal.



5. LA PLACA de la corona imperial correspondiente a la frente, la de mayor tamaño de las ocho, exhibe una ornamentación variadísima. La base de oro que se halla detrás de cada una de las piedras preciosas está recortada, de modo que la luz puede atravesarlas. Las piedras grandes están sujetas por unas garras de oro aisladas, de tres dedos, y orladas por un doble círculo de perlas ensartadas, que producen el efecto de finas cadenas de oro de perlas. Esos círculos se hallan unidos a su vez entre sí por unas bolitas de oro de buen tamaño, que están soldadas y parecen eslabones. Esta es una característica importante para determinar la fecha. Las gruesas bolitas de oro, por su parte, están sostenidas por al menos cuatro tubitos de oro batido, que no son visibles en la ilustración. Los engastes de las grandes perlas están hechos de pequeñas perlas ensartadas; las grandes perlas están atravesadas por un hilo, lo que hace que parezcan flotar libremente. Las perlas y las piedras preciosas están colocadas formando una especie de rejilla; el espacio libre entre ellas se halla recubierto por zarcillos soldados, que también son de hilo de perlas, por tubitos de oro y por cruces hechas de hilo liso de oro, las cuales están coronadas por pequeñas pirámides de bolitas de oro.

Lo anterior es algo que se sigue del análisis que viene a continuación.

La cimera y la cruz frontal

La cimera se diferencia tanto del aro de la corona como de la cruz frontal, además de por sus formas decorativas, por el número de quilates de su oro, por la talla de sus piedras preciosas y por el grosor de sus perlas ensartadas. Eso indica que se debe necesariamente a manos distintas de las que fabricaron el aro y la cruz, y acaso también que fue confeccionada en fecha distinta. Ahora bien, es evidente que desde el principio se previó que hubiese una cimera, pues las vainas en que va sujeta se hallan orladas del mismo hilo de perlas con que van adornadas las caras posteriores de las placas de la corona. El hilo no presenta, por otro lado, ningún desperfecto indicador de que en él se hubieran realizado cambios con posterioridad.

No cabe decidir con seguridad si, como supone Fillitz, la cimera actual vino a sustituir a otra anterior. Si el aro de la corona hubiera sido realizado ya en los años en que gobernó Enrique II, cosa que por razones estilísticas no puede descartarse del todo, entonces es posible que llevase una cimera con el nombre del citado emperador. Pero es más plausible pensar que Conrado II, tras ser coronado rey (ceremonia en la que seguramente hubo de emplearse una corona de Enrique II, dado el escaso tiempo que transcurrió entre la elección y la coronación), se hiciese construir una corona nueva y propia y que previsoramente mandara que tuviese vainas donde poder fijar la cimera. Desde luego Conrado II sólo pudo añadir la cimera al tiempo de su coronación como emperador, o en una fecha posterior, pues el derecho de llevar corona con cimera estaba reservado exclusivamente al emperador. Las vainas para sujetar la cimera contradicen también la hipótesis de que el aro de la corona pudiera ser la heredada corona real de Borgoña.

Para la cruz frontal, que va provista de un mango, no existe, en cambio, una vaina propia donde fijarla. Es preciso deslizarla, de una manera completamente provisional, entre la vaina delantera de la cimera y la piedra preciosa superior de la placa correspondiente a la frente. Además, el borde delantero de la cimera se arquea tanto que la cruz no puede mantenerse recta, sino que se inclina ligeramente hacia adelante. Si la cruz fuese más antigua que la cimera y hubiese estado prevista desde el principio, cabe pensar que no se hubiese recurrido a tal solución de emergencia.

Viniendo ahora a los elementos decorativos de la cruz, ya hemos dicho que ésta se sitúa, por lo que se refiere al estilo, entre las placas del aro de la corona, realizadas antes del año 1027, y la cruz imperial que Conrado II hizo construir hacia el año 1030 para guardar en ella dos reliquias: la santa lanza, adquirida

	Carolingio				Otoniano																			
	Desde (*circa*) 800 hasta 900				Otón I-Otón III (936-1002)								Enrique II (1002 a 1024)											
	Altar de Volvinus, Milán, 824 a 835	Codex Aureus de Lindau, tapa delantera, hacia 870	Codex Aureus de San Emerano, hacia 870	Cruz de Berengario, Monza, comienzos del siglo X	Cáliz y patena de San Gaucelino, hacia mediados del siglo X	Pendientes bizantinos de media luna, segunda mitad del siglo X	Cruz antigua de la abadesa Matilde, Essen, 973 a 982	Corona de placas de Preslav, hacia 971	Codex Aureus de Echternach	Evangeliario, signatura 4451, Munich	Evangeliario, signatura 4453, Munich	Niño Jesús de la Madonna de Essen, hacia 1000	Cruz de la emperatriz Gisela, hacia 1006	Evangeliario, signatura 4454, Munich	Estuche del códice de Uta, inventario 13601, Múnich, hacia 1020	Manuscrito latino 9453, París, comienzos del siglo XI	Fíbula piramidal de oro de las cercanías de Maguncia	Antependio de Basilea, hacia 1020	Cruz de Enrique, Basilea, hacia 1020	Fíbula en forma de estrella, Nueva York	Par de fíbulas en forma de estrella, coro de la catedral de Maguncia	Libro de las perícopes de Enrique II	Espada de las abadesas, Essen	Altar portátil de Enrique II, 1014 a 1024
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
a	●		●							●														
b		●									○													○
c			○	●																				
d		○	○	●			●					●		●	●			●			●	○	●	○
e			●											●								○		●
f					●																			●
g						●								●							●			
h								○														○		
i									○			○												
k										●										●	●			
l												○	●											
m																	●							
n																			○					○
o																								
p																								
q				●																●	●			
r																							●	
s															○									
t																								
u																								

6. SE ENUMERAN todos los elementos decorativos del aro de la corona y se señala su presencia en otros trabajos de orfebrería, datados con suficiente seguridad, de los tiempos en cuestión. Los puntos negros significan caracteres que coinciden; los círculos, caracteres que se parecen. Argumentos en favor de que el aro de la corona

	Salio																																	
	Conrado II (1024 a 1039)										Enrique III (1039 a 1056)												Enrique IV (1056 a 1106)											
Elementos decorativos de las placas de la corona — Caras delanteras	Cruz de la corona imperial	Fíbula cónica, Minden	Fíbula arqueada, con guirnalda en forma de tambor, Schleswig	Fíbula Terslev, del tesoro de Digrans, 1025 a 1035	Fíbula Terslev, del tesoro de Kännungs, 1025 a 1030	Estauroteca bizantina de Donauwörth, antes de 1029	Cruz imperial de Conrado II, hacia 1030	Cruz capitular de Colonia, hacia 1030	Loros de la emperatriz Zoe, mosaico de Santa Sofía, 1028 a 1042	Cruz de San Servacio, Maastricht, segundo cuarto del siglo XI	Loros de Maguncia, segundo tercio del siglo XI	Par de fíbulas cónicas de Maguncia, segundo tercio del siglo XI	Pendientes en media luna, de Maguncia, segundo tercio del siglo XI	Pequeña fíbula cónica de Maguncia, segundo tercio del siglo XI	Cruz con placas de esmalte rebajado, Essen	Cruz moderna de la abadesa Matilde, Essen	Evangeliario de Ariberto da Intimiano, antes de 1045	Cara anterior del portapaz, de Essen	Cruz de la abadesa Teófanu de Essen, 1039 a 1056	Corona de Constantino Monómaco, 1042 a 1050	Altar portátil de la condesa Gertrud, hacia 1045	Ornamentación de la Madonna de Hildesheim	Fíbula ovalada de Rheinhessen	Cruz capitular de Osnabrück, hacia 1070	Cruz de Gandersheim, hacia 1070	Anillo de Adalbero de Metz, antes de 1072	Evangeliario de Judit de Flandes	Cruz condal de Anno, antes de 1075	Cruz de Erpho, hacia 1090	Cruz de Adelaida de Hungría, 1077 a 1108	Evangeliario de Vercelli, finales del siglo XI (?)	Evangeliario de Helmarshausen, hacia 1100	Evangeliario de Freckenhorst, hacia 1100	Cruz de Dionisio, de Enger, hacia 1100
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58
Bolitas de oro en el círculo de perlas ensartadas	●			●	●					●	●										●									●				
Tubitos con pirámide de bolas							○																	○										
Tubitos soporte hechos de latón																																		
Piedras preciosas rodeadas de perlas en las cuatro esquinas	●							●	○						●	●			●		●						○	●	●	●	●			
Piedras preciosas rodeadas de perlas en forma de cruz	●							●								○										○				●				
Zarcillo con flor en forma de panícula	●						●										●								●		●				●			●
Perla sujeta en un círculo abierto de perlas ensartadas	●										●	●		●								●												
Placa de esmalte abombada con figuras humanas						○									○		●		●	●											●			
Cruz diagonal con piedras preciosas en forma de gotas						●			○							○												●				●	●	
Brazos de cruz hechos de triángulos de perlas									●																									●
Garras sujetadoras de tres dedos	●	●	●									○	●	○										●								○		
Perla con espiga y pirámide de bolas																							●											
Cruz ensartada con pirámide de bolas															○																			
Bolas de oro sustentadoras	●	●	●								●	●		●								●				●								
Piedras preciosas en un engaste sencillo de garras									●	●	●																							
Caras posteriores																																		
Superficies recortadas con orla de perlas ensartadas													●										○											
Ornamento en forma de corazón con flor de panícula sujeta																								○			●							
Borde de pedúnculos sujetos				○																														
Borde con triángulos de círculos de perlas ensartadas					○																													
Ornamento en forma de corazón con pedúnculos sujetos																		●	●															●

fue construido en los primeros tiempos de los Salios son sobre todo la combinación entre sujeciones de garras aisladas de tres dedos (l) y las bolas de oro que soportan libremente los círculos de perlas ensartadas (o), así como la presencia de piedras preciosas sujetas por cuatro sencillas garras de hilo de oro en sus abiertos engastes de perlas ensartadas (p). Las perlas ensartadas en círculo aparecen en una joya bizantina anterior (6), pero en territorio alemán no aparecen hasta después del año mil.

por Enrique I, quien gobernó de 919 a 936, y un fragmento de una vara de largo de la cruz de Cristo, regalo del emperador bizantino. Con la posterior colocación de la cruz frontal lo que Conrado II probablemente quiso fue que su corona se pareciese todavía más a la corona imperial bizantina, que tanto había influido en ella como modelo. Es posible que también hiciera arrancar una pequeñísima astilla de la madera de la cruz de Cristo y colocarla en la cruz frontal, por ejemplo en la perforación que hay en el gran zafiro del centro; con eso abrigaría la esperanza de que aquella preciada reliquia no sólo santificase la corona, sino a la vez proporcionase al Imperio la especial protección y bendición de Dios.



7. LA CIMERA de la corona imperial está sujeta a ésta y se halla adornada por una cresta formada por ocho placas que llevan por los dos lados "escritura de perlas". La cimera se diferencia de las placas de oro que forman el aro no sólo por los quilates de su oro y por el grosor de sus perlas ensartadas, sino también por sus sencillos engastes, en forma de alvéolo, de las perlas y piedras preciosas. Además esos engastes están bruñidos, y no meramente pulidos. En el aro hubo ya desde el primer momento vainas para sujetar en ellas la cimera. No es posible decidir con total seguridad si la cimera actual sustituyó a otra más antigua. Por otro lado, en otro tiempo estuvo rota y ha sido reparada.

¿Fue el autor un orfebre de tierras meridionales?

La procedencia de la corona es casi tan discutida como su antigüedad. La mayoría de los historiadores del arte considera que es obra de un orfebre alemán, cuyo taller, sin embargo, ha sido ubicado en los más diversos puntos del Imperio alemán de entonces: en Fulda, en Colonia, en Maguncia, en Ratisbona, en Reichenau y en la Lorena.

Ahora bien, mi análisis minucioso de todos los elementos decorativos ha proporcionado un gran número de indicaciones nuevas acerca de la procedencia de la persona que fabricó las placas del aro de la corona. Así, casi todas sus formas ornamentales están tomadas de la orfebrería mediterránea e incluso hay algunas de esas formas que se daban exclusivamente allí. Esto prueba que su autor fue un orfebre procedente de tierras meridionales, presumiblemente de Italia.

Un indicio importante son las placas de oro que llevan esmaltes rebajados. (El esmalte fundido en la base de oro rebajada se halla al mismo nivel que las partes no esmaltadas de la placa.) La superficie de esos esmaltes tiene un abombamiento inusitado, y eso es una característica típica de las obras procedentes de Bizancio y de Italia durante los siglos XI y XII. Esos esmaltes, además, no llevan una orla de perlas ensartadas o de filigrana, cosa que era usual en Alemania.

Por otro lado los reyes veterotestamentarios representados en los esmaltes llevan una capa con una aplicación rectangular de tela; esa aplicación está situada en el margen de la parte delantera de la capa y se parece al *tablion* que aparecía en la capa (una clámide) de los oficiales del ejército bizantino. Los artistas alemanes de la Alta Edad Media no representaban capas de ese tipo, pero sí lo hacían, en cambio, los artistas italianos, como aquel maestro que en el año 1075, por encargo de Enrique IV, decoró un manuscrito en Roma con miniaturas del rey Salomón.

Decir que "el maestro de las placas de la corona" fue un hombre procedente de tierras meridionales no equivale a decir que esa persona tuviera que trabajar necesariamente por entonces en tierras situadas al sur de los Alpes. Podría encontrarse, por el contrario, en el séquito del emperador, igual que otros muchos artistas de Bizancio o de Italia, o bien haberse establecido por aquella época en una de las grandes ciudades de Renania.

Un sitio probable donde podría haber estado ese taller de orfebrería es Maguncia, pues esta ciudad era por aquel entonces una importante plaza comercial y el centro del más extenso de los arzobispados del Imperio; era además la sede permanente del archicanciller alemán, así como escenario de coronaciones, sínodos, dietas y otros acontecimientos representativos. Y, en fin, fueron sobre todo los emperadores salios los que visitaron Maguncia con especial frecuencia.

Dado que la cruz y la cimera de la corona imperial salieron evidentemente de manos distintas de las que construyeron el aro, pero nos es desconocida la estructura interna de los talleres de orfebrería del período salio, resulta imposible decidir si esas tres partes fueron confeccionadas en lugares distintos o, sencillamente, realizadas por varios maestros del mismo taller, que tendrían orígenes dispares. En todo caso la gran similitud de las formas ornamentales induce a pensar que la cruz frontal de la corona imperial bien pudo ser obra del mismo orfebre que construyó la gran cruz imperial por encargo de Conrado II.

También queda así resuelto convenientemente el enigma de por qué la corona imperial personal de Conrado II pudo pasar a ser de improviso la corona imperial tradicional y la más importante de todas las insignias del

Imperio. Hasta los tiempos de su predecesor, Enrique II, la insignia imperial más destacada había sido la santa lanza, y no la corona imperial. Los soberanos medievales solían incluso poseer varias coronas, que podían regalar a discreción. La lanza santa, por el contrario, era intransferible.

Este traspaso de importancia de la lanza santa a la corona imperial se explica de un modo muy claro, sin embargo, si tenemos en cuenta el concepto enteramente nuevo, más abstracto, que los Salios tuvieron del Estado; ese concepto establecía una distinción entre la persona privada del soberano y el titular del cargo. Es algo que se ve por vez primera en un discurso dirigido por Conrado II a los habitantes de Pavía. Estos, al morir su antecesor, Enrique II, habían demolido el palacio imperial de aquella ciudad, convencidos de que ya no tenían rey. Conrado II les hizo saber, sin embargo, que su acción era punible; lo expresó con estas palabras: "Aunque el rey esté muerto, el Imperio perdura, igual que perdura un barco cuyo timonel haya fallecido."

Enrique III, hijo y sucesor de Conrado II, no hizo construir, tras la muerte de éste en 1039, ninguna corona nueva para sí, en contra de lo que había venido haciéndose hasta entonces. Al asumir la corona de su antecesor en el cargo, creó a sabiendas una tradición nueva. Seguramente quiso expresar con ello que la corona imperial era para él el símbolo del Imperio y de la dignidad imperial y que, por tal motivo, subsistiría, al igual que esas instituciones, a la muerte de los soberanos particulares. De hecho la corona ha sobrevivido incluso al propio Sacro Imperio Romano.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DIE REICHSKRONE. Helmut Trnek, en Weltliche und Geistliche Schatzkammer. Bildführer des Kunsthistorischen Museums Wien, n.º 153. Residenz-Verlag, Viena 1987.

DIE REICHSKRONE. GESCHICHTE UND BEDEUTUNG EINES EUROPÄISCHEN SYMBOLS. Reinhart Staats. Verlag Vandenhoeck und Ruprecht, Göttingen 1991.

DIE KAISERKRONE KONRADS II. (1024-1039). EINE ARCHÄOLOGISCHE UNTERSUCHUNG ZU ALTER UND HERKUNFT DER REICHSKRONE. Mechthild Schulze-Dörrlamm. Monographien des Römisch-Germanischen Zentralmuseums, Band 23. Jan Thorbecke Verlag, Sigmaringen 1991.



8. LA CRUZ frontal es por necesidad un añadido posterior, pues no existe en el aro una vaina destinada a sujetarla. Se halla sujeta de manera verdaderamente provisional por detrás del zafiro superior de la placa correspondiente a la frente y, a causa de la cimera, está ligeramente inclinada hacia adelante. La parte delantera de la cruz está adornada con piedras preciosas, perlas, pequeñas bolas de oro ensartadas y zarcillos ensartados de filigrana. En la parte posterior aparece la imagen del Crucificado, burilada y nielada, es decir, las ranuras están rellenas con un esmalte negro. En sus formas decorativas la cruz frontal coincide en parte con las placas que forman el aro de la corona y en parte con la gran cruz imperial que el emperador Conrado II hizo construir hacia el año 1030 para conservar en ella la punta de la santa lanza (hasta entonces suprema insignia imperial) y otra reliquia, una larga astilla de la cruz de Cristo.

Resistencia de los superconductores de alta temperatura crítica

Se empieza a vislumbrar cómo interfiere el movimiento de los vórtices magnéticos en el flujo de corriente eléctrica

David J. Bishop, Peter L. Gammel y David A. Huse

Cuando se descubrieron los superconductores de alta temperatura en 1986, se despertaron atrevidas esperanzas. Pronto emergieron, sin embargo, varias dificultades que sofocaron el entusiasmo. Uno de los peores inconvenientes es que su estado superconductor se destruye cuando se les somete a un campo magnético, cosa que debe hacerse en muchas de las aplicaciones concebibles. La resistencia al flujo de corriente eléctrica se origina cuando el campo magnético penetra en el superconductor en forma de haces discretos, que llamamos líneas de flujo. Las líneas de flujo están constituidas por torbellinos de corriente eléctrica, y por eso se les denomina a menudo vórtices. Si los vórtices se mueven, pueden impedir el flujo de electrones. Saber cómo se mueven y organizan estos vórtices a distintas temperaturas y en campos magnéticos diversos reviste el mayor interés para controlar el fenómeno y mantener el flujo superconductor.

De un tiempo reciente a esta parte conocemos mucho mejor los vórtices. Sabemos ahora que son capaces de formar varias fases nuevas de la materia en la familia de los superconductores de alta temperatura crítica. Para describir estas fases nuevas —sólidos, líquidos y vidrios de vórtices—, fue preciso desechar ciertos puntos de vista sobre la superconductividad y proponer nuevas hipótesis basadas en conceptos modernos relativos a la materia condensada. Con el fin de contrastar las nuevas aportaciones se han elaborado técnicas experimentales de una sensibilidad sin precedentes.

DAVID J. BISHOP, PETER L. GAMMEL y DAVID A. HUSE trabajan en los laboratorios AT&T Bell de Murray Hill. Sus gustos coincidentes en física se desarrollaron bajo la supervisión de John D. Reppy y Michael Fisher en la Universidad Cornell, donde los tres obtuvieron su grado de doctor. Bishop investiga las propiedades estáticas y dinámicas de los vórtices magnéticos de los superconductores exóticos. A Gammel le interesa el transporte por carga única en pequeñas uniones de efecto túnel. Huse ha profundizado en la teoría de las transiciones de fase en varios materiales, incluyendo los vidrios de espín.

No debería sorprendernos que los conocimientos acumulados sobre el estado superconductor hasta 1986 fuesen incapaces de describir la superconductividad de alta temperatura crítica. Las primeras ideas acerca de la superconductividad evolucionaron a partir de la observación de superconductores convencionales. Estos materiales, generalmente metales y aleaciones que nos son familiares, conducen la electricidad sin resistencia a condición de que se refrigeren a temperaturas que estén pocos grados por encima del cero absoluto. La curiosidad que sentía hacia el comportamiento de la materia a bajas temperaturas condujo a Heike Kammerlingh Onnes al descubrimiento de la superconductividad en 1911. Pudo hacerlo porque había ya conseguido la licuación del helio, último de los gases nobles en ser condensado. El helio líquido permitió a Onnes enfriar los materiales a temperaturas próximas a un kelvin del cero absoluto.

Se cuenta, quizás apócrifamente, que el hallazgo tuvo lugar cuando Onnes pidió a un alumno que midiera la resistencia eléctrica del mercurio. El estudiante informó que la resistencia desaparecía cuando la temperatura de la muestra alcanzaba 4,2 K. Onnes le envió de vuelta al laboratorio para que buscara el "error" que había causado lo que no era, según creía, sino un resultado experimental espurio. Pero, tras intentarlo varias veces, no se halló el tal "error", y cayeron en la cuenta de que habían logrado un descubrimiento histórico. Onnes ganó el premio Nobel en 1913 por este y muchos otros importantes logros en la física de bajas temperaturas.

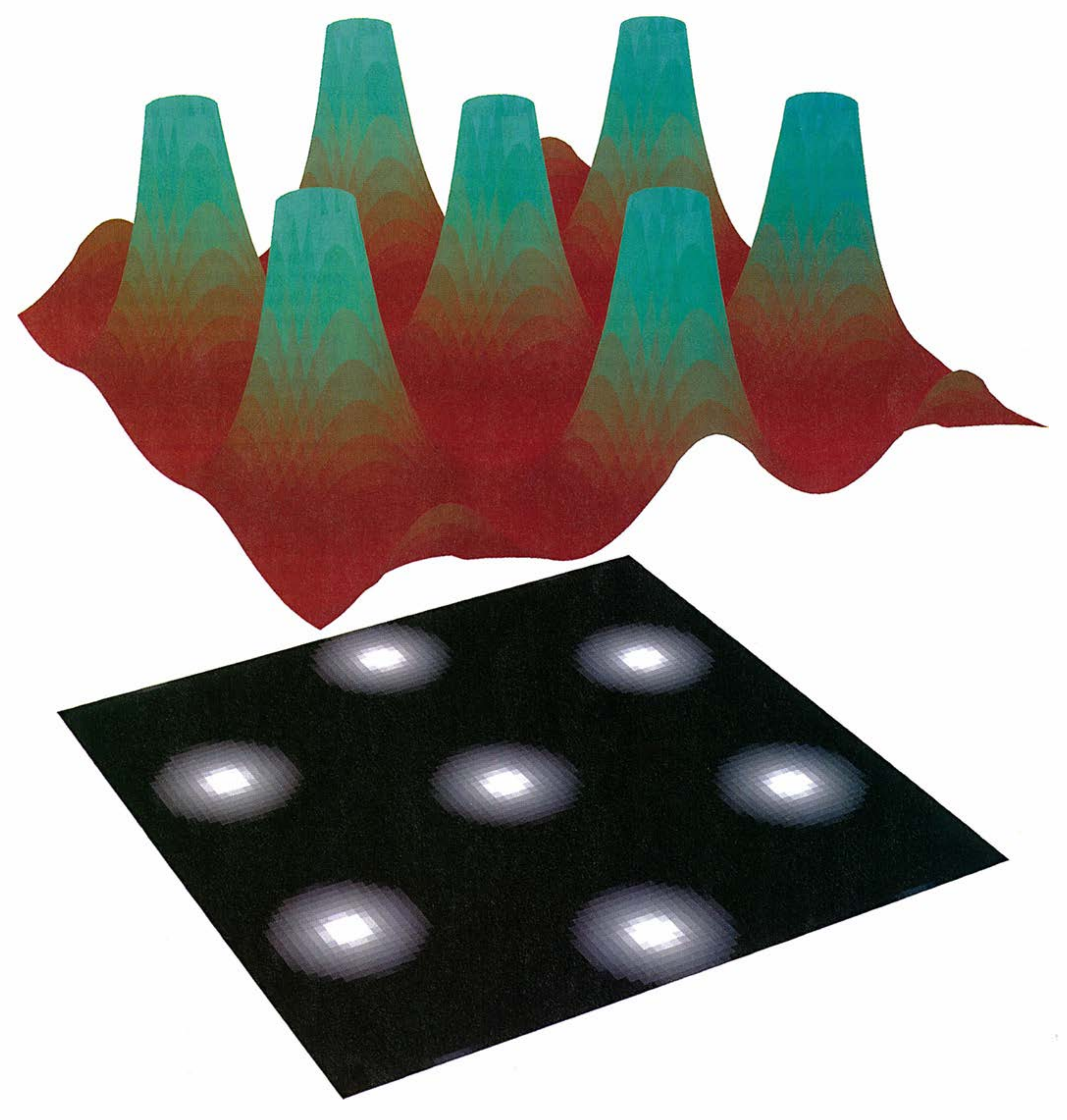
No fue la nula resistencia al paso de corriente eléctrica el único motivo de asombro. Lo fue también el comportamiento de los superconductores sometidos a un campo magnético. En 1933, Walther Meissner y R. Ochsenfeld descubrieron que un campo magnético aplicado a un superconductor es expulsado del interior de éste cuando se enfría el material por debajo de su temperatura de transición superconductora. La expulsión completa del campo magnético se conoce hoy como efecto Meissner. Junto con la ausencia de resistencia, la propiedad de expulsar a los campos magnéticos ha avivado el interés por la superconductividad.

Llegados a ese punto, la observación había superado a la teoría. Los modelos cuánticos desarrollados en los años treinta podían dar cuenta de la conductividad de los metales norma-

1. VORTICES, representados como tubos volcánicos de color verde y rojo; son haces discretos de líneas de campo magnético que penetran en el superconductor. La imagen de computador representa la intensidad del campo magnético (simbolizado a su vez por la altura de los tubos) sobre la superficie de la muestra. El campo es máximo en el centro de cada vórtice. En la proyección bajo la imagen, los vórtices aparecen como puntos blancos, y se muestra que forman un patrón triangular regular en el seno del superconductor.

les, pero no del estado superconductor. El problema resultó inabordable hasta que en los años cincuenta Vitaly L. Ginzburg y Lev D. Landau desarrollaron una teoría fenomenológica que formulaba una serie de ecuaciones descriptivas de la transición del estado normal al superconductor. Pero no dieron la causa del fenómeno. Por fin, en 1957, John Bardeen, Leon N. Cooper y J. Robert Schrieffer desarrollaron la teoría que explica microscópicamente la superconductividad, conocida, en honor a sus autores, como teoría BCS. Según ella, los electrones de conducción viajan sin encontrar resistencia porque se mueven a pares, los pares de Cooper, que los electrones forman porque interaccionan con los fonones, vibraciones mecánicas de la red cristalina del metal semejantes a ondas de sonido. El movimiento de los átomos de la red tiende a neutralizar la repulsión de los electrones entre sí, y hasta produce una pequeña fuerza atractiva entre ellos. La eficacia de esta interacción depende de la temperatura. Se llama temperatura de transición al punto de la escala térmica donde aparece la superconductividad. Las fluctuaciones térmicas a temperaturas superiores a este punto crítico destruyen los pares de Cooper y, en consecuencia, la superconductividad del metal.

La interacción que origina estos pares determina dos escalas de longitud microscópicas importantes en un superconductor. La primera de ellas es la separación espacial de los electrones en el par de Cooper. Nos referimos a esta distancia como a la longitud de coherencia. Es la distancia más corta en un superconductor en la que cambian las propiedades electrónicas (la resistividad local, por ejemplo). En los superconducto-



res típicos, la longitud de coherencia va de unos cientos a unos miles de angstroms. (Un angstrom mide 10^{-10} metros; en la mayoría de los materiales los átomos están separados por distancias de uno a tres angstroms.)

La segunda longitud microscópica característica está relacionada con la intensidad del efecto Meissner, esto es, la capacidad que tienen los superconductores de expulsar un campo magnético que se les aplique. Cuando se somete un superconductor a un pequeño campo magnético, se crean corrientes que fluyen cerca de la superficie del material. Estas corrientes inducidas crean a su vez un campo magnético que anula en el resto del material el campo magnético aplicado. La magnitud de estas corrientes inducidas decrece exponencialmente a medida que aumenta la distancia del punto interior donde se mida a la superficie. La longitud que sufre la disminución se denomina longitud magnética de penetración. Es la distancia más corta en la que un campo magnético puede cambiar en el interior de un superconductor. En los superconductores típicos, esta longitud va de cientos a decenas de miles de angstroms.

Estas longitudes microscópicas definen dos categorías muy diferentes de superconductores: de tipo I y de tipo II. En los superconductores de tipo I, la longitud de coherencia es mayor que la longitud de penetración. Estos materiales tienden a ser superconductores de baja temperatura y bajo campo críticos. Si el campo alcanza una intensidad crítica (que varía de una sustancia a otra), penetrará en el material destruyendo el estado superconductor. Como su falta de resistencia desaparece con campos bajos, no se aprecia que esos superconductores lleguen a tener aplicaciones de interés.

Los superconductores de tipo II son mucho más útiles. Su longitud de penetración es mayor que su longitud de coherencia. En consecuencia, se mantienen en estado superconductor incluso tras haber penetrado en ellos el campo magnético. Los de tipo II pueden soportar campos magnéticos intensos (hasta la magnitud del llamado campo crítico superior), y, por tanto, transportar corrientes más altas. Todos los superconductores de valor técnico, incluidos los de alta temperatura conocidos, son de este tipo.

En los años cincuenta, el físico ruso Alexei A. Abrikosov publicó la teoría básica del comportamiento de los superconductores convencionales de tipo II en un campo magnético. Basándose en el trabajo de Ginzburg y Landau, demostró que la respuesta magnética de un superconductor de tipo II por debajo de la temperatura crítica depende de la intensidad del campo aplicado y de la temperatura. Tal relación puede representarse en un diagrama de fases magnético, donde se muestra que un superconductor convencional presenta tres estados magnéticos diferentes.

El primero es el estado Meissner, es decir, aquel donde el material expulsa el campo aplicado. El superconductor se encontrará en tal estado mientras el campo magnético sea inferior a cierta intensidad. Al campo límite se le denomina campo crítico inferior, y en general depende de la temperatura.

El segundo estado aparece cuando el campo aplicado aumenta hasta valores superiores al campo crítico inferior. En estas condiciones, el campo magnético todavía puede penetrar en el superconductor, pero la penetración no es completa ni homogénea; sólo perforan la muestra líneas de flujo discretas, intrusiones tubulares del campo magnético. La mecánica cuántica de los superconductores requiere que cada línea de flujo tenga la misma magnitud, el *cuanto de flujo*; cualquier variación del campo magnético modificará, pues, la densidad de líneas de flujo. En otras palabras, la distancia entre las líneas cambia en respuesta a la variación del campo. La configuración de energía mínima de tal distribución de líneas es (observada la superficie a vista de pájaro) una red triangular.

La estructura de las líneas individuales de flujo depende de la longitud de coherencia y de la longitud de penetración. Cada línea tiene un pequeño núcleo. El diámetro del núcleo depende de la longitud de coherencia. En el interior del núcleo, el material es un metal normal. Las supercorrientes circulan alrededor del núcleo (por esta corriente circulante, los físicos denominan al núcleo línea de vórtice). Las supercorrientes producen un campo magnético; la distancia a la que llega es la longitud de penetración. Podemos representar los vórtices mediante partículas magnéticas. En las imágenes que se obtienen se distingue bien la red triangular, con su excelente ordenación.

Si el campo aplicado aumenta hasta un segundo punto crítico, aparece el tercer y último estado magnético de los superconductores. La superconductividad se destruye cuando el campo supera ese valor crítico, y el material vuelve a su estado normal. La destrucción tiene lugar porque el aumento de la intensidad del campo magnético hace que las líneas de vórtice se apiñen

2. FLUJO DE CORRIENTE a través de un superconductor (*caja rectangular azul*), que puede ser roto por los vórtices (*cilindros*). Cada vórtice consiste en un anillo de corriente circular (no representado) inducido por el campo magnético. La corriente aplicada se suma a la corriente que circula por un lado del vórtice, pero se resta al otro lado. El resultado neto es una fuerza que empuja los vórtices perpendicularmente a la dirección de la corriente; el movimiento disipa energía y produce resistencia.

Representación de la red de flujo superconductor

De niños, todos hemos "decorado" con un papel y limaduras de hierro las líneas de campo magnético que un imán permanente produce. Algunos todavía decoramos el campo magnético que atraviesa un superconductor. Un campo magnético pequeño entra en el superconductor en haces discretos llamados líneas de flujo o vórtices. Las líneas se organizan en un patrón regular. Varias técnicas pueden revelar este patrón, entre ellas la dispersión y la microscopía de barrido por efecto túnel, pero la decoración magnética es quizá la más simple y directa.

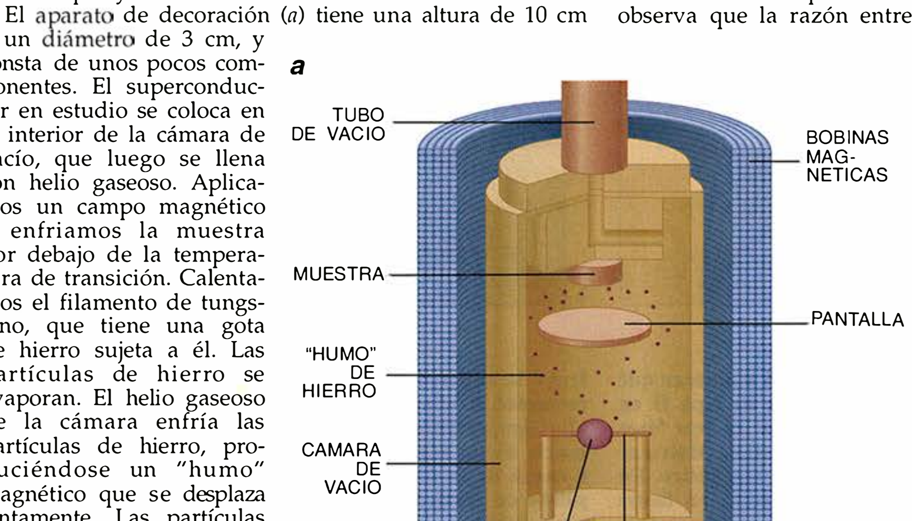
El aparato de decoración (*a*) tiene una altura de 10 cm y un diámetro de 3 cm, y consta de unos pocos componentes. El superconductor en estudio se coloca en el interior de la cámara de vacío, que luego se llena con helio gaseoso. Aplicamos un campo magnético y enfriamos la muestra por debajo de la temperatura de transición. Calentamos el filamento de tungsteno, que tiene una gota de hierro sujeta a él. Las partículas de hierro se evaporan. El helio gaseoso de la cámara enfría las partículas de hierro, produciéndose un "humo" magnético que se desplaza lentamente. Las partículas de hierro del humo miden unos 100 angstroms de diámetro. Derivan hacia la superficie del superconductor rodeando la pantalla que protege la muestra del calor. Una vez allí, las partículas decoran las regiones por donde las líneas de flujo magnético atraviesan la superficie. Las partículas se "adhieren" a la superficie a causa de las ligeras fuerzas atractivas que existen entre todas las partículas. Esta fuerza de van der Waals actúa a modo de "pegamento atómico". La muestra puede calentarse a temperatura ambiente sin que se le desprendan las partículas de hierro. Utilizamos entonces un microscopio electrónico para formar una imagen directa de las partículas de hierro, que reproducen el patrón original de la red de flujo.

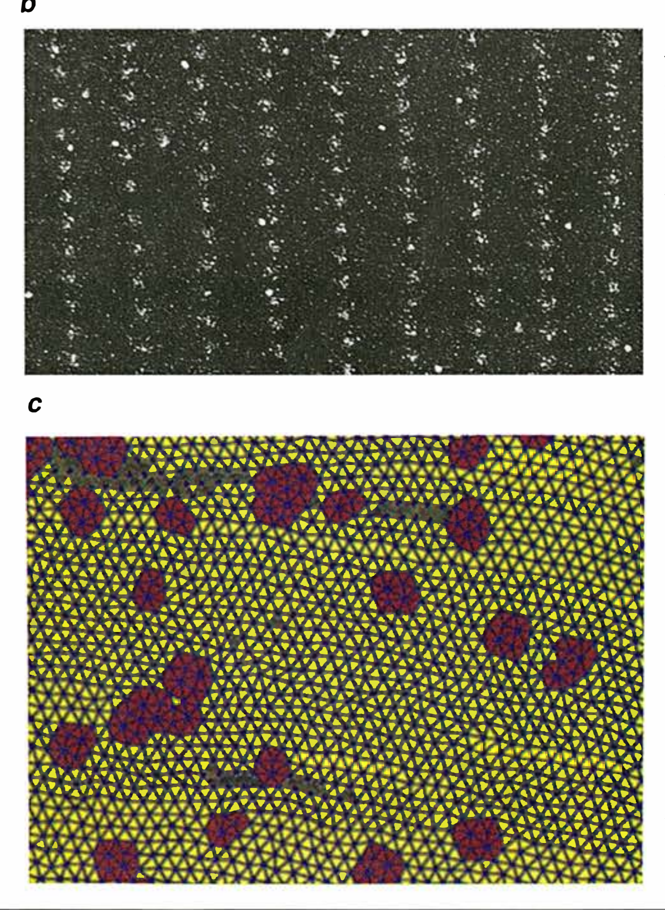
Las líneas de flujo aparecen como puntos, descubriendo la naturaleza bien ordenada de la red. A partir de esas imágenes, se determina la cantidad de flujo magnético que tiene cada línea de campo. Se trata de una constante fundamental de los superconductores, llamada cuanto de flujo, ϕ_0. En todos los superconductores conocidos, $\phi_0 = hc/2e$, donde h es la constante de Planck, c la velocidad de la luz y e la carga del electrón. El "2" del denominador es consecuencia directa del emparejamiento de los electrones de corriente en los superconductores. En los primeros días de la superconducción de alta temperatura, algunos pensaron que el cuanto de flujo podría tener un valor diferente en estos materiales. Experimentos como el descrito aquí, que cuentan, simplemente, el número de líneas de flujo, descartaron esa posibilidad. Contando las líneas, se observa que la razón entre el campo magnético aplicado y la densidad de líneas de flujo es igual al cuanto de flujo conocido.

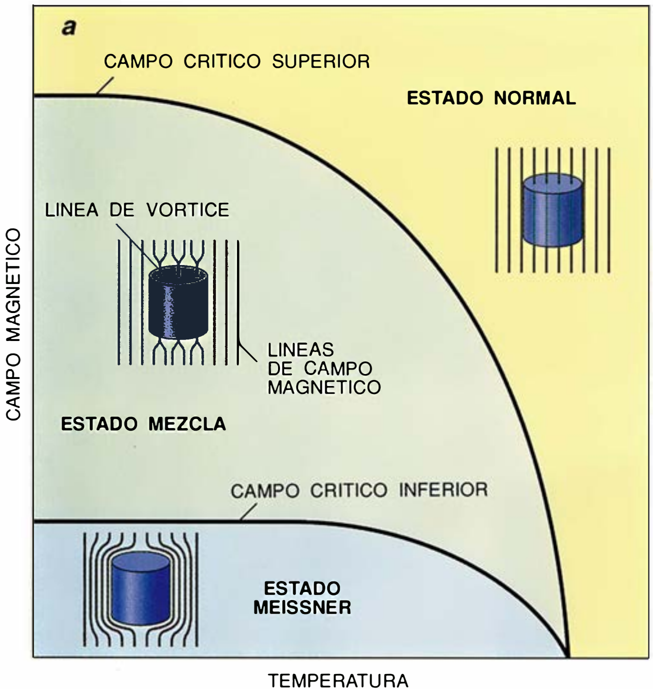
Los experimentos de decoración nos han permitido ver otras estructuras. El patrón de las líneas de flujo es diferente cuando las líneas de campo aplicado inciden en la muestra formando cierto ángulo respecto a un eje principal cristalográfico. En lugar del retículo regular aparecen entonces cadenas de flujo (*b*).

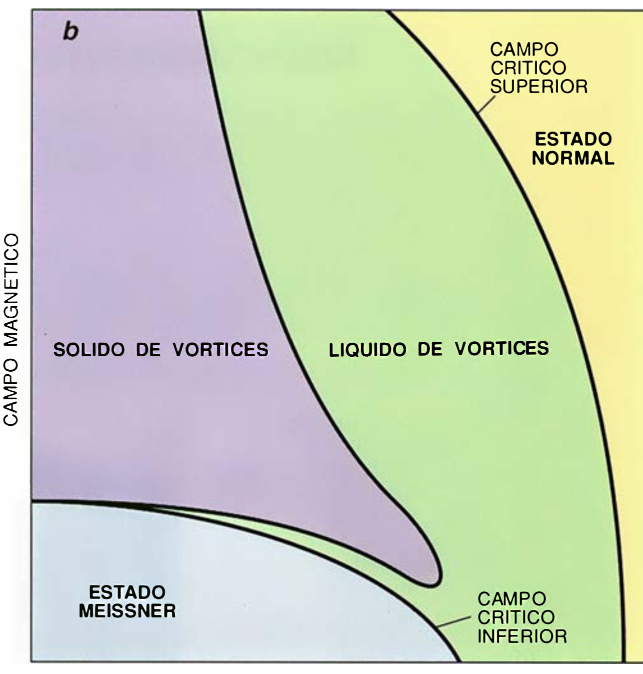
Las imágenes obtenidas propician varios tipos de análisis cuantitativos. Tras digitalizar la ubicación de las líneas de campo, un computador dibuja líneas entre todos los puntos de la red de flujo (*c*). En una red triangular perfecta, cada línea de flujo tiene seis vecinos más próximos. Los defectos en la red aparecen como líneas de flujo con un número diferente de vecinos más próximos. Los defectos han sido sombreados en rojo.

Estas decoraciones demuestran que la red de flujo superconductora puede adoptar un patrón específico llamado orden hexático. En las estructuras que poseen ese orden, las posiciones de las partículas pueden ser aleatorias, pero los ángulos de enlace entre los vecinos más próximos habrán de ser similares. En el patrón triangular que mostramos, los ángulos de enlace son aproximadamente iguales de un extremo al otro de la figura. Pero a causa de los defectos, las partículas se espacian de manera uniforme sólo en regiones pequeñas. La mejor manera de contemplar esta ordenación de los ángulos de enlace es la siguiente: pongan el borde de la página cerca del ojo, y miren a lo largo de las hileras.









3. LOS DIAGRAMAS DE FASE MAGNETICOS muestran qué sucede cuando se introduce un superconductor de tipo II en un campo magnético. El diagrama *a* representa las tres fases de los superconductores convencionales. En el estado Meissner (*ángulo inferior izquierda*), se expulsa el campo magnético. En el estado mezcla (o de vórtices) el campo penetra en haces discretos, o líneas de flujo. En el estado normal el campo destruye la superconductividad y penetra en el material uniformemente. El diagrama *b* muestra que los superconductores de alta temperatura tienen fases similares, excepto por la existencia de un régimen de líquido de vórtices, estado que se da a causa de la fusión, debida a las fluctuaciones térmicas, del sólido de vórtices, que es, bien reticular (en los superconductores limpios), bien vítreo (en los sucios).

más estrechamente. Por comportarse como metales normales los núcleos de vórtices, si se solapan demasiado no queda espacio suficiente para que persista la superconductividad.

La descripción de los tres estados magnéticos parecía dar cuenta con suficiente detalle de los efectos de la aplicación de un campo magnético a un superconductor. En 1986 J. Georg Bednorz y K. Alex Müller hallaron superconductores de tipo II de una naturaleza distinta; se trataba de una familia de cerámicas de óxido de cobre, que presentaba en algunos casos superconducción a temperaturas superiores a los 120 K. Las temperaturas críticas más altas de los superconductores convencionales están entre los 20 y los 25 K. Los superconductores de alta temperatura galvanizaron al mundo científico. Estos materiales podían enfriarse con nitrógeno líquido. Hasta los refrigeradores de laboratorio más pequeños pueden enfriarlos por debajo de la temperatura de transición.

Por muy excitantes que fueran las altas temperaturas críticas, no pudo, en cuanto se estudiaron las propiedades de estos nuevos superconductores en función del campo magnético, obviarse una molesta realidad: los superconductores de alta temperatura no se comportaban según el modelo de Abrikosov. Las discrepancias se descubrieron al abordar el comportamiento de los nuevos superconductores bajo los campos magnéticos que habrían de sufrir en su utilización tecnológica, cuya intensidad asciende hasta cerca de 10 teslas (un tesla es alrededor de 20.000 veces la intensidad del campo magnético terrestre). Sometidos a campos de esta intensidad, la resistencia de algunos de estos materiales sólo disminuyó una vez que la temperatura hubo bajado hasta el 20 o 30 % de la temperatura de transición superconductora. En ciertos casos, la resistencia bajo campo de algunos materiales se mantuvo 100 veces mayor que la del cobre. Parecía que las ventajas de los superconductores de alta temperatura se esfumaban. Nuevos experimentos descubrieron el porqué. Las líneas de vórtices se comportaban de forma poco usual, y no siempre se organizaban en una red triangular rígida; al contrario, se halló que la red de vórtices se "fundía" en un estado parecido al líquido, con lo que se iba suprimiendo la transición del material al estado superconductor.

Hay toda una variedad de razones por las que este nuevo estado de la materia, el líquido de vórtices, debe obstaculizar el paso de corriente en los superconductores de alta temperatura. Quizá la mejor forma de entender el efecto sea imaginar las líneas de vórtices en un superconductor como gomas elásticas. Las líneas de vórtices y las gomas elásticas tienden a ser cortas, ya que alargar una línea o estirar una goma cuesta energía. Sin embargo, las fluctuaciones térmicas tienden a oponerse a esa tendencia. Tales fluctuaciones hacen que los átomos de los sólidos y las líneas de vórtices vibren al aumentar la temperatura con amplitud cada vez mayor. En ese caso, las líneas de vórtices se "estiran". Por otro lado, la energía del vórtice intenta restaurar la línea a su estado no estirado.

Esta fuerza restauradora es función de la longitud de coherencia y de la longitud de penetración. Una longitud de coherencia larga o una longitud de penetración corta producen una intensa fuerza restauradora y ponen límite a las vibraciones térmicas de las líneas de vórtices. La mayoría de los superconductores de tipo II gozan de tales características. La fuerza restauradora es dominante, y mantiene las líneas de vórtice rectas y cortas. Por tanto, las fluctuaciones térmicas de las líneas de vórtice son pequeñas.

Por otro lado, los superconductores de alta temperatura tienen características prácticamente opuestas: la

longitud de coherencia es corta y la de penetración, larga. La longitud de correlación es a veces tan sólo de unos pocos angstroms, vale decir, de 10 a 100 veces inferior a la de un superconductor convencional. La longitud de penetración de los superconductores de alta temperatura varía desde 100 hasta más de 100.000 angstroms, valores que exceden los de los superconductores convencionales por un factor de 10 a 100.

Al darse de consuno con las altas temperaturas de transición, los valores extremos de las longitudes de coherencia y de penetración indican que las líneas de vórtice sufren grandes fluctuaciones térmicas en los superconductores de alta temperatura. En efecto, a temperatura elevada las líneas vibran tanto, que la red de vórtices se "funde". El fenómeno remeda el de la fusión del hielo a causa de las vibraciones térmicas de las moléculas de agua. En algunos materiales de alta temperatura, el líquido de vórtices persiste en un rango de temperatura más amplio que el estado reticular.

¿Por qué afecta el líquido de vórtices a la resistencia del superconductor? La respuesta la hallaremos si reflexionamos sobre lo que sucede cuando se envía una corriente por un superconductor de tipo II al que se le está aplicando un campo magnético. Recordemos que cada línea de vórtice consiste en unas corrientes eléctricas que circulan alrededor de un núcleo normal (no superconductor). Cuando una corriente eléctrica adicional fluye por la muestra, se suma a la corriente que circula a un lado del vórtice y se resta de la corriente del lado opuesto. Como resultado, se produce una fuerza que actúa sobre la línea de vórtice. La fuerza tiende a mover el vórtice en una dirección perpendicular simultáneamente a la línea de vórtice y a la de la corriente aplicada. Esta es la fuerza de Magnus. Es similar a la sustentación que un ala de avión genera, circunstancia en la que el aire circula más rápidamente sobre la superficie superior del ala que bajo la inferior. Si las líneas de vórtices, en respuesta a la fuerza de Magnus, se mueven, disiparán energía de la corriente. Más en concreto, la disipación inducirá en la muestra un voltaje y, por tanto, resistencia.

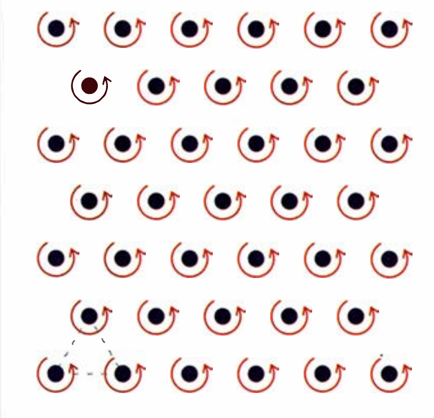
La medición de esta resistencia muestra que el líquido de vórtices se comporta como el agua corriente cuando está cerca de su punto de fusión. Hemos investigado la resistencia de una muestra del superconductor de alta temperatura $YBa_2Cu_3O_7$ (itrio-bario2-cobre3-oxígeno7, abreviado YBCO) en función de la temperatura en un campo magnético constante. A alta temperatura (esto es, en la fase de líquido de vórtices) la resistencia lo es también. Al bajar la temperatura, el líquido de vórtices se congela y entra en el estado reticular de vórtices. Por tanto, las líneas ya no tienen libertad de movimiento y la resistencia desaparece.

Dichas medidas de resistencia también mostraron que el líquido de vórtices está subenfriado antes de congelarse. El fenómeno se parece al que sufre el agua pura, donde la fase líquida persiste hasta cierto punto por debajo del punto de congelación. El subenfriamiento puede describirse más técnicamente: al calentarse, la substancia no desanda los mismos pasos que recorre durante el enfriamiento. Se dice que estos procesos presentan histéresis.

Sin embargo, el conocimiento del comportamiento del estado líquido de vórtices y del proceso de congelación que lo transforma en un retículo abre un interrogante esencial respecto a la aplicabilidad de estos nuevos superconductores. El líquido de vórtices se congela y forma una red regular solamente si el material está limpio. Pero, ¿qué sucede si el superconductor está "sucio", esto es, si hay impurezas químicas y defectos en la red atómica? La cuestión no es trivial. Los superconductores que tengan utilidad técnica habrán de estar, inevitablemente, ensuciados. De hecho, quienes trabajan con superconductores convencionales introducen tales defectos en el material de forma controlada. Cuanto más sucio sea un superconductor, más corriente podrá transportar. Tales imperfecciones son deseables porque "anclan" los vórtices e impiden que se muevan llevados por la fuerza de Magnus. Las líneas de vórtice prefieren

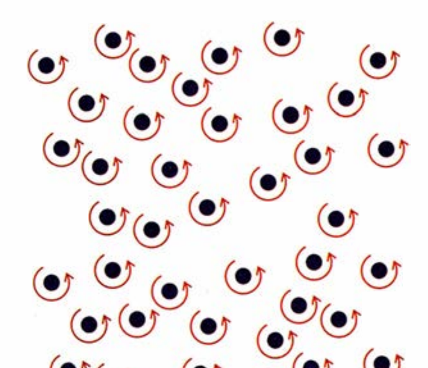
Estados de un sólido de vórtices

Un superconductor en un campo magnético se "congela" de dos formas. Si el material está limpio, las líneas de vórtices se organizarán en una distribución triangular y se formará una red de vórtices. Si la sustancia tiene muchos defectos o impurezas, las líneas constituirán un patrón desordenado y se formará un vidrio de vórtices.





RED DE VORTICES

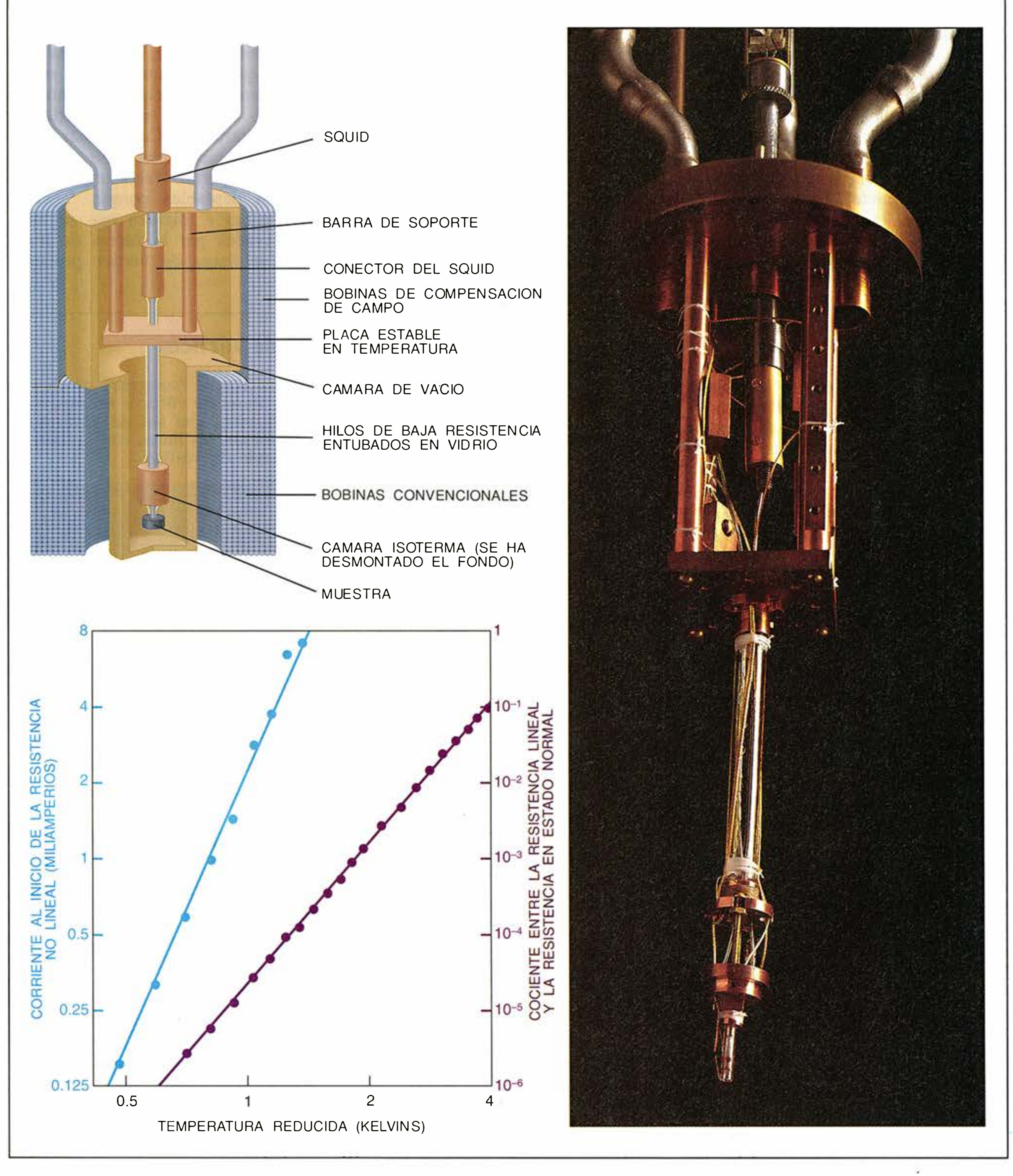




VIDRIO DE VORTICES

El picovoltímetro SQUID

Este dispositivo explora los distintos estados de vórtices. El diagrama (*esquina superior izquierda*) muestra los rasgos esenciales del picovoltímetro. Las bobinas normales y de compensación permiten aplicar a la muestra un campo de varios teslas. La cámara isoterma mantiene constante la temperatura de la muestra dentro de un margen de varios milikelvins. La muestra está conectada al SQUID, que mide pequeñas variaciones eléctricas, mediante hilos eléctricos de baja resistencia entubados en vidrio. En la fotografía (*a la derecha*) se han retirado las bobinas magnéticas y las cámaras de vacío e isoterma para que se vea el interior con mayor claridad. Las medidas realizadas con el dispositivo han confirmado el modelo del vidrio de vórtices. En un experimento se estudió la corriente (*azul*) y la resistencia (*morado*) en una región donde las propiedades del superconductor no son lineales; reproducimos los resultados (*esquina inferior derecha*). Los datos caen en una línea recta, según predice la teoría. La temperatura reducida es la diferencia entre la temperatura de la muestra y la temperatura en la que aparece la fase del vidrio superconductor de vórtices.

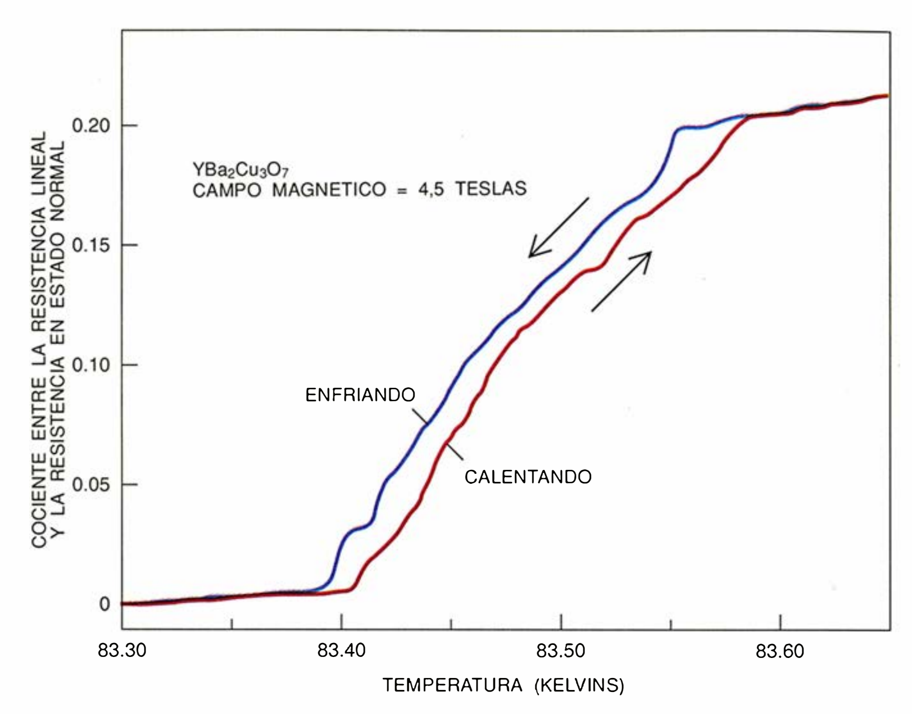


tener posiciones fijas en la red cristalina, pues entonces su energía disminuye. La situación es análoga a la de una canica rodando por una mesa microagujereada. La simple experiencia nos dice que la canica preferirá quedarse en uno de los agujeros de la mesa, donde su energía potencial gravitatoria es menor.

El anclaje tiene un efecto característico en el sólido de vórtices de un superconductor: desorganiza el patrón de red regular que en un material puro e ideal se formaría. En otras palabras, el anclaje impide que el material se condense, produciendo un sólido de vórtices perfecto, cuando se le somete a campos magnéticos intensos. En lugar de esto, la fase que se genera es, como se la viene llamando, un vidrio de vórtices. El término es apropiado, pues las posiciones de los vórtices adoptan una disposición irregular y desordenada, similar a la que tienen las moléculas en un vidrio.

La idea de vidrio de vórtices no tuvo mucha aceptación cuando fue propuesta en 1989. Otras explicaciones, la que trata a las líneas de vórtices como partículas individuales, por ejemplo, podían dar cuenta también del comportamiento observado en los materiales de alta temperatura. Sin embargo, el modelo del vidrio de vórtices hacía varias predicciones contrastables. Establecía que, si la concentración de defectos de anclaje era elevada, el líquido de vórtices se congelaría de forma regular y pasaría al estado vítreo. Este comportamiento difiere del observado en los materiales puros, en los que el líquido de vórtices se solidifica de manera más bien abrupta y presenta, además, histéresis. El modelo del vidrio de vórtices describía también el comportamiento de la resistividad en función de la temperatura, la corriente y el campo magnético.

No se tuvo la oportunidad de verificar claramente el modelo del vidrio de vórtices hasta que no se pudieron llevar a cabo medidas de transporte sensibles, de un tipo que no solía emplearse en superconductores. En concreto, se diseñó un aparato que podía medir el voltaje en un superconductor de alta temperatura con resolución que iba más allá del picovolt (10^{-12} volts), hasta ese momento inalcanzable. El picovoltímetro utiliza un dispositivo superconductor de interferencia cuántica, o SQUID. Estos dispositivos se basan en efectos cuánticos para medir variaciones muy pequeñas de corriente y voltaje. Con un SQUID, el picovoltímetro tiene una sensibilidad alrededor de un millón de veces mayor que un voltímetro corriente. La resolución es suficientemente alta como para confirmar o poner en entredicho la teoría del vidrio de vórtices.



4. EL ENFRIAMIENTO y el calentamiento de un cristal muy limpio del superconductor YBCO en un campo magnético producen gráficas de resistencia que no coinciden exactamente. La medición muestra que la red de vórtices se funde bruscamente, y que el líquido de vórtices se puede "subenfriar" un poco antes de congelarse, tal y como le pasa al agua.

Los principios en que se funda el propio picovoltímetro son harto simples. Se colocan las muestras en un recipiente aislado que mantenga controlada la temperatura con un error de unos pocos milikelvins. Unas bobinas rodean el recipiente y aplican un campo magnético uniforme a la muestra. La corriente se envía mediante unos cables conectados a la muestra, y el picovoltímetro mide la resistencia. El SQUID y los imanes superconductores son superconductores convencionales de baja temperatura —una vieja técnica que nos ayuda a medir y comprender la nueva—.

El aparato confirmó, de manera espectacular, las predicciones del modelo del vidrio de vórtices. Las resistencias y corrientes medidas coincidieron con las predichas por el modelo, y se vio que disminuían regularmente hasta cero conforme la temperatura se iba acercando al punto de congelación del líquido. Este comportamiento es muy distinto del que se observa en cristales límpidos: en ellos, la transición de fase es brusca y presenta histéresis. La observación demuestra la importancia del desorden que el anclaje induce —el papel de la "suciedad", por así decirlo— en la modificación de la dinámica de la transición de fusión. El líquido de vórtices de un cristal desordenado se condensa en un estado de vidrio de vórtices en vez de hacerlo en estado sólido.

Los superconductores a altas temperaturas están mejorando el conocimiento de la superconducción de tipo II. Por ejemplo, ahora sabemos que el vidrio de vórtices existe también en los superconductores convencionales, si bien es difícil observarlo. Pero ¿podremos traducir de forma efectiva este saber en aplicaciones prácticas? Para ello, buscamos un tipo de defectos que ancle los vórtices más eficazmente.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SUPERCONDUCTIVITY. Dirigido por R. D. Parks. Marcel Dekker 1969.

INTRODUCTION TO SUPERCONDUCTIVITY. Michael Tinkham. Robert E. Krieger Publishing, 1980.

MAGNETIC FLUX-LINE LATTICES AND VORTICES IN THE COPPER OXIDE SUPERCONDUCTORS. D. J. Bishop, P. L. Gammel, D. A. Huse y C. A. Murray en *Science* vol. 255, págs. 165-172; 10 de enero de 1992.

ARE SUPERCONDUCTORS REALLY SUPERCONDUCTING? D. A. Huse, Matthew P. A. Fisher y Daniel S. Fisher en *Nature*, vol. 358, n.º 6387, págs. 553-559; 13 de agosto de 1992.

Dedos de cinc

Desempeñan un papel fundamental en la regulación de la actividad génica de muchas especies, desde las levaduras hasta el hombre. No hace ni diez años, todavía se desconocía su existencia

Daniela Rhodes y Aaron Klug

Uno de los problemas más fascinantes de la biología actual es el de averiguar cómo se expresan los genes. Para que un gen se active, cierto grupo de proteínas, los factores de transcripción, deben unirse a determinado segmento del gen, el promotor. Se dicta así la orden de "puesta en marcha", que es la señal para que una enzima transcriba otro segmento genético de ADN en ARN. En la mayoría de los casos, la molécula de ARN que resulta sirve de molde para la síntesis de una proteína específica; otras veces, el propio ARN es el producto final. Pero, ¿cómo se las arregla un factor de transcripción para reconocer su diana específica en un promotor, con la exuberancia de ADN que hay en la célula?

Muchos factores de transcripción contienen pequeñas protuberancias, o dedos de cinc, perfectamente adaptados para reconocer ADN. En nuestro laboratorio del Consejo de Investigaciones Médicas en Cambridge, se identificó el primer dedo de cinc en 1985. Lo portaba un factor de transcripción de rana. Desde entonces, se han descubierto más de 200 proteínas, muchas de ellas factores de transcripción, con dedos de cinc. Otros factores de transcripción alojan estructuras o motivos similares. Varios laboratorios, el nuestro entre ellos, han comenzado a descrifrar el mecanismo que emplean los dedos de cinc y otras estructuras parecidas para reconocer y unirse a sus dianas específicas en el ADN.

Los dedos de cinc no agotan los medios de interacción entre el factor y el ADN. Recuérdense otras estructuras: motivos hélice-giro-hélice (descubiertos en 1981), dominios homeóticos y cremalleras de leucina. Pero el dedo de cinc es, con diferencia, la vía de unión al ADN más frecuente.

Las investigaciones en el campo del reconocimiento del ADN apuntan, en última instancia, hacia una presa de mayor vuelo: ¿cómo se produce el desarrollo en los organismos pluricelulares? Aunque todas las células del embrión portan los mismos genes, unas células se diferencian en neuronas y otras irán a formar parte de la epidermis. Sus destinos divergen porque, a medida que el embrión avanza en su desarrollo, van activándose combinaciones diferentes de genes, sintetizándose proteínas especializadas que confieren a las células diferenciadas sus propiedades características. Saber cómo reconocen los factores de transcripción sus dianas específicas en el ADN resulta imprescindible para comprender la activación selectiva de los genes.

DANIELA RHODES y AARON KLUG trabajan en el Laboratorio de Biología Molecular del Consejo de Investigaciones Médicas en Cambridge. Rhodes, doctora en bioquímica por la Universidad de Cambridge, entró en el Consejo en 1969. Klug, Nobel de química en 1982, empezó a trabajar en el Laboratorio de Biología Molecular en 1962, y ahora es su director. Entre los méritos reconocidos al otorgarle el máximo galardón se citaba su aportación al desarrollo de las técnicas de microscopía electrónica aplicadas a la determinación de la estructura de complejos formados por moléculas biológicas.

Nuestro descubrimiento de los dedos de cinc hundía sus raíces en los trabajos de Robert G. Roeder y Donald D. Brown. En 1980, los equipos encabezados por Roeder y Brown resolvieron las etapas del proceso de transcripción de un gen de la rana *Xenopus laevis.* Demostraron que el factor de transcripción IIIA (FTIIIA) era uno de los tres factores, por lo menos, requeridos para activar el gen que determina la síntesis del ARN 5S, que forma parte de los ribosomas, lugar donde las moléculas de ARN mensajero (el producto típico de la transcripción de los genes) se traduce en proteína.

Más adelante se vio que el FTIIIA se unía a un segmento de ADN, de unos 45 pares de bases. Las bases son los "peldaños" de esa familiar "escalera" que es el ADN. (El ADN consta de dos cadenas de nucleótidos, compuestos a su vez de azúcar desoxirribosa, un grupo fosfato y una de las cuatro bases: adenina, timina, guanina o citosina. Las dos cadenas se mantienen unidas por enlaces que se producen entre sus bases, de suerte que adenina siempre se empareja con timina y citosina con guanina.)

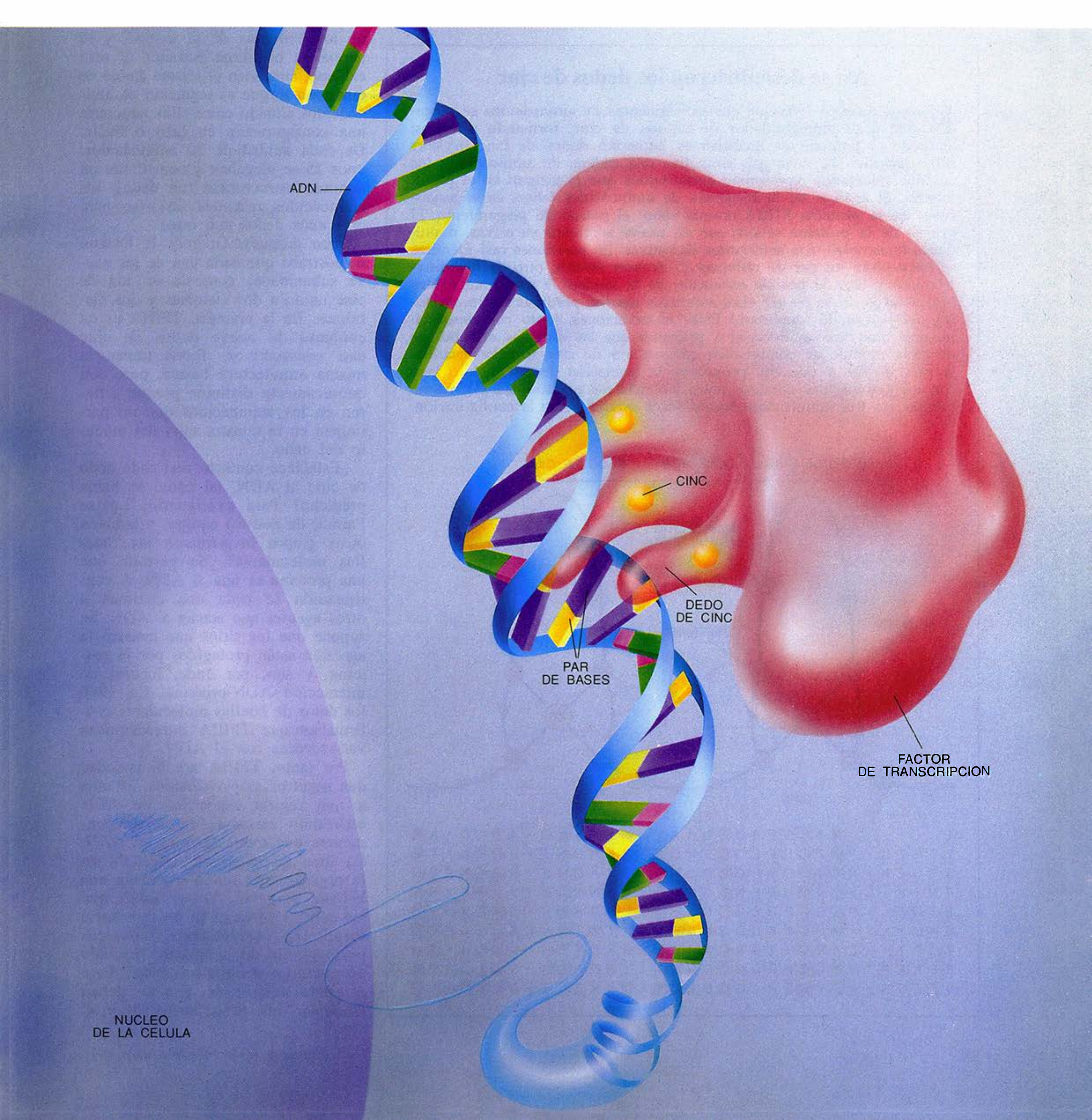
Nos sorprendió la longitud del sitio reconocido por FTIIIA, habida cuenta del tamaño pequeño del propio FTIIIA. Factores de transcripción de igual talla, identificados ya en bacterias, reconocían fragmentos de ADN mucho menores, de unos 15 pares de bases. ¿En virtud de qué el FTIIIA, una molécula pequeña, abarcaba tamaño segmento de ADN? La pregunta, obvia, parecía poder responderse. Aunque los factores de transcripción se suelen producir en cantidades pequeñas, el FTIIIA abunda en los ovarios de las ranas inmaduras. Se almacena formando complejo con el ARN 5S, en cuya síntesis interviene. Su abundancia nos llevó a pensar que podríamos recolectar suficiente complejo FTIIIA-ARN 5S

1. TRES DEDOS DE CINC (*protuberancias*) sobresalen de un factor de transcripción, o proteína reguladora de la actividad génica (*rojo*). Se fijan al surco mayor de la molécula de ADN (*doble hélice*). Los dedos de cinc son el puente entre los factores de transcripción y sus genes diana. Se unen al ADN por secuencias específicas de pares de bases: los "peldaños" de la "escalera" que es el ADN. Se llaman dedos de cinc porque asen al ADN y porque el cinc (*bolas amarillas*) desempeña un papel fundamental en la determinación de su estructura.

para aislar la proteína. Una vez conseguido, podríamos hurgar en la organización tridimensional de la proteína y en la unión a su diana en el gen del ARN 5S.

El plan era bueno, pero pronto encontramos una dificultad, que a la postre sería afortunada, ya que nos conduciría al descubrimiento de los dedos de cinc. En 1982, Jonathan Miller aplicó en nuestro laboratorio una conocida técnica para extraer de los ovarios de rana el complejo FTIIIA-ARN 5S. El resultado podía calificarse de desastre, pues obtuvo muy poco. El método empleado eliminaba un metal necesario para mantener unido al complejo. Una vez que Miller modificó el procedimiento de extracción, y consiguió una cantidad aceptable del complejo, comprobó que el metal que se perdía era el cinc. Cada unidad FTIIIA-ARN 5S incorporaba entre 7 y 11 iones de cinc, una cifra altísima. Otros experimentos nos condujeron posteriormente a los dedos de cinc.

Cuando se trataba el FTIIIA con una proteasa, el factor se fragmentaba en trozos cada vez menores, que disminuían de tres en tres kilodalton (una medida del peso molecular). Las unidades de tres kilodalton resistían el ataque, por la razón verosímil de su fuerte plegamiento. Adivinábase así un FTIIIA constituido, casi en su totalidad, por una sucesión de segmentos de 3 kd (equivalente a unos 30 aminoácidos por cada segmento) plegados alrededor de un ion de cinc, formando un dominio compacto y pequeño de unión al ADN.

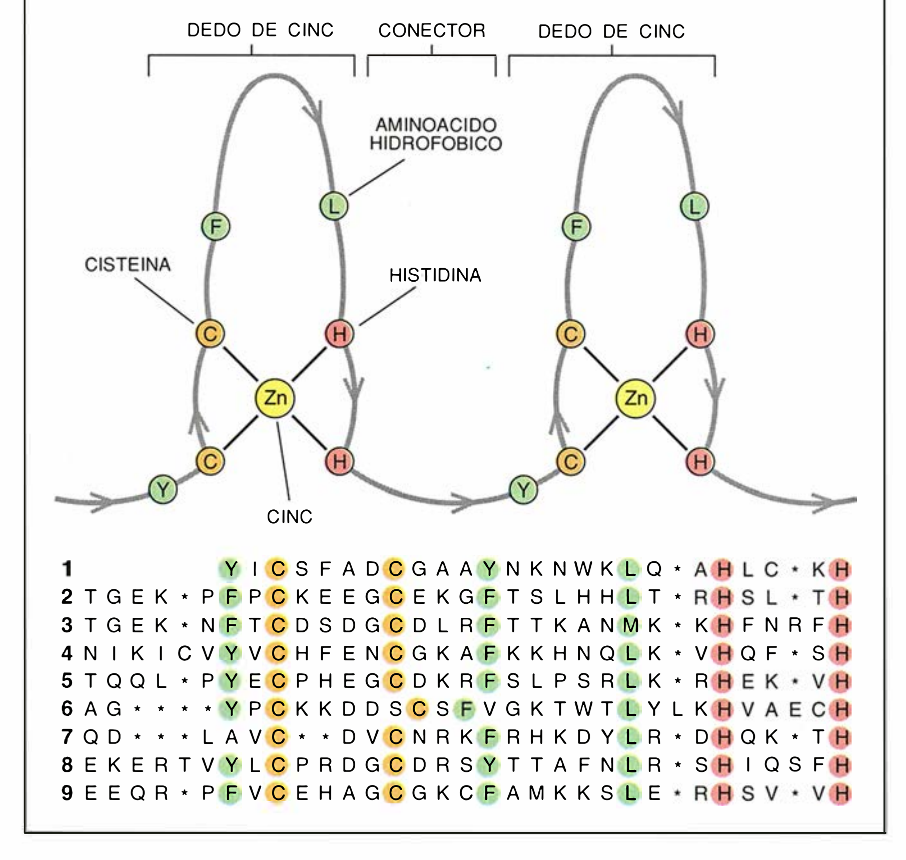


Si la intuición era certera, habíamos encontrado un nuevo tipo de factor de transcripción. Los hasta entonces estudiados interaccionaban con el ADN constituidos en dímeros, o parejas, en los que cada subunidad del dímero contactaba con el ADN a través de un exclusivo motivo de unión. A tenor de nuestro hallazgo, el FTIIIA podía extenderse por la doble hélice, asiéndola en varios puntos, y no en uno solo o en dos. Estos múltiples contactos explicarían también el tamaño insólito del FTIIIA.

Mientras especulábamos con nuestro modelo, el grupo de Roeder publicó la secuencia de aminoácidos de FTIIIA. En esa secuencia encontramos el apoyo necesario para nuestra propuesta: las primeras tres cuartas partes de la proteína forman una hilera continua de nueve unidades similares, de unos 30 aminoácidos. Además, en cada subunidad, y en posiciones casi idénticas, se encuentra una pareja de cisteínas y otra de histidinas. Este último descubrimiento estaba en consonancia con la idea de que cada unidad debía contener sus propios iones de cinc, ya que en las proteínas el cinc suele darse ligado a cuatro aminoácidos, cisteínas por lo común o combinación de cisteínas e histidinas.

Así se descubrieron los dedos de cinc

Klug dedujo en 1985 que ciertos segmentos de aminoácidos se plegaban a su aire alrededor de un ion de cinc, formando módulos; andando el tiempo, los módulos se llamarían dedos de cinc (*regiones entre corchetes*). La línea gris simboliza una cadena de aminoácidos; los círculos coloreados representan aminoácidos que participan en el plegamiento. El análisis de la secuencia de aminoácidos (*abajo, letras mayúsculas*) de la proteína FTIIIA orienta sobre el patrón de plegamiento. El grueso de la proteína se dispone en nueve secciones sucesivas, o unidades (*numeradas*), con semejanzas llamativas. En posiciones casi idénticas se encuentran un par de cisteínas (*C de color dorado*), otro de histidinas (*H rojas*) y (con la posible excepción de la unidad 7) tres aminoácidos hidrofóbicos (*letras verdes*). (Los asteriscos marcan pérdidas sin importancia del patrón de identidad.) Estas observaciones, junto con descubrimientos bioquímicos, llevaron a proponer que las cisteínas e histidinas de cada módulo se combinaban con un ion de cinc (*círculos amarillos grandes, arriba*), y que ello provocaba la formación de un bucle o lazo con los aminoácidos situados entre las cisteínas e histidinas. Al mismo tiempo, los tres aminoácidos hidrofóbicos estabilizarían la configuración.

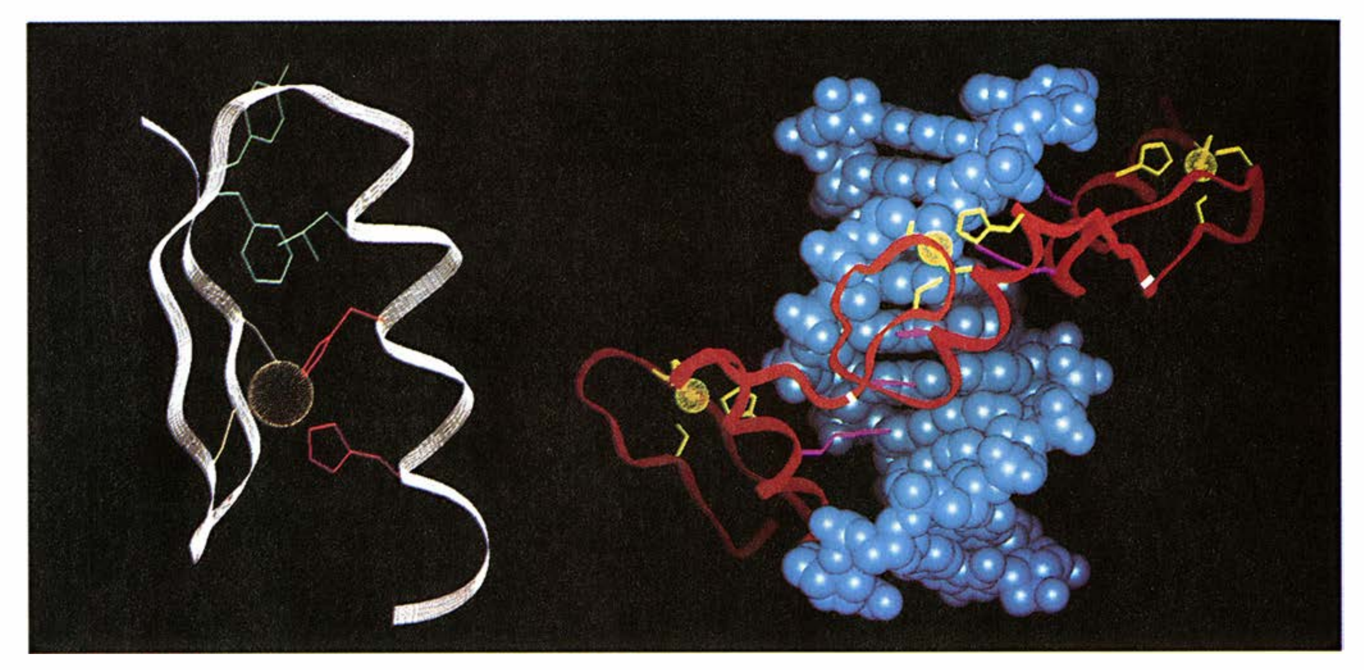


En 1985, esos resultados determinaron que uno de nosotros (Klug) propusiese que esas cisteínas e histidinas invariantes (fijas) servían para que cada subunidad se plegase independientemente, formando un minidominio de unión a ADN. Más tarde se le llamó dedo de cinc por su función: la de aferrarse a la doble hélice de ADN. Avanzó también que la pareja de cisteínas próxima a uno de los extremos de la unidad, y la pareja de histidinas próxima al otro extremo, atraparían el mismo átomo de cinc, con lo que el segmento de aminoácidos situado entre ellas adoptaría una configuración en lazo o bucle. De cada unidad de 30 aminoácidos, unos 25 se plegaban y constituían un dominio estructurado (un dedo); los aminoácidos restantes servirían para unir unos dedos con otros.

Poco después, Gregory P. Diakun demostraba que cada una de las nueve subunidades contenía un ion de cinc unido a dos cisteínas y dos histidinas. En la práctica, TFIIIA es un conjunto de nueve dedos de cinc casi consecutivos. Todos tienen la misma arquitectura básica, pero son químicamente distintos porque difieren en los aminoácidos que no participan en la construcción del módulo del dedo.

¿Establece contacto real cada dedo de cinc al ADN, tal como se había predicho? Para averiguarlo, Louise Fairall, de nuestro equipo, y también otros grupos investigaron las "huellas moleculares". Se permite que una proteína se una al ADN. A continuación se trata con enzimas u otros agentes que atacan al ADN. Se supone que los sitios que resisten la agresión están protegidos por la proteína, y son, por ende, lugares de interacción ADN-proteína. En 1986 los datos de huellas moleculares confirmaban que TFIIIA interaccionaba varias veces con el ADN.

Por tanto, TFIIIA era la novedad que nosotros sospechábamos. Se unía a una región específica de ADN utilizando varios módulos independientes que contactan con el ADN. La idea de economía implícita en la organización modular era de una belleza singular. Ya se sabía que las células conseguían un repertorio amplio de conmutadores genéticos permutando un conjunto limitado de factores de transcripción. Esto es, para activar un gen se deben combinar las proteínas a, b y c,



2. ESTRUCTURA DEL DEDO (*izquierda*), conocida desde finales de los años ochenta. La cinta representa el esqueleto de carbono y nitrógeno de la cadena de aminoácidos. La mitad izquierda de este esqueleto se pliega sobre sí misma, formando una subestructura con dos cadenas que recibe el nombre de hoja beta (*región en V*). La mitad derecha se enrolla en una hélice alfa (*espiral*). La unión con el cinc (*bolas amarillas*) a través de las cisteínas presentes en la hoja beta (*líneas amarillas*) e histidinas de la hélice (*líneas rojas*) mantiene a las dos mitades juntas por la base del dedo. Permite también el acercamiento de aminoácidos hidrofóbicos (*verde*) en la punta del dedo (*parte superior de la imagen*). Su atracción mutua ayuda a mantener intacta la estructura. A la derecha, tres dedos de cinc en tándem (*cintas rojas triseccionadas por líneas blancas*), pertenecientes a la proteína reguladora Zif268, se engarzan (*magenta*) en las bases presentes en el surco mayor del ADN (*azul*). En conjunto ocupan casi una vuelta de la doble hélice. Apreciamos aquí cinco de las seis bases implicadas en los contactos. Las líneas amarillas y los anillos representan conexiones entre el cinc y las cisteínas e histidinas. El modelo de Zif268 está basado en análisis de cristalografía de rayos X realizados por Nikola P. Pavletich y Carl O. Pabo.

mientras que para activar otro se precisan las a, b y d. Con este tipo de estrategia, los organismos evitan tener que producir factores de transcripción exclusivos para cada uno de los numerosos genes que hay que activar en cada célula.

Los estudios sobre los dedos de cinc revelaban que la lógica combinatoria podía operar también en el interior del propio factor de transcripción. Una célula puede producir una gran cantidad de factores de transcripción variando el tipo, orden y número de módulos independientes de unión al ADN en cada proteína. La combinación particular de dedos de cinc en un factor de transcripción concreto le permite a éste reconocer una secuencia específica de ADN y no otra.

La eficacia de la estrategia basada en combinaciones nos llevó a sugerir que el motivo "dedo de cinc" podía estar presente en muchas proteínas. Y efectivamente es asombrosa la cantidad de proteínas de organismos eucarióticos que lo tienen (los eucariotas son organismos más avanzados que las bacterias). Peter F. R. Little estima que el 1 % del ADN en células humanas especifica dedos de cinc. En el cromosoma 19 este valor llega hasta un 8 %. Las proteínas con dedos de cinc identificadas hasta el momento contienen desde 2 hasta 30 dedos en tándem.

Para entender cómo se las ingenia el dedo de cinc para reconocer determinada secuencia de bases —que adopta una conformación específica— es preciso conocer la estructura tridimensional de aquél. La mayoría de las proteínas contiene regiones locales de estructura "secundaria", que se pliegan unas con otras hasta producir la forma tridimensional global de la proteína. Las estructuras secundarias más comunes son las hélices alfa (donde el esqueleto de la proteína se enrolla en una espiral característica) y la cadena beta (donde el esqueleto aparece desplegado).

Jeremy M. Berg descifró los rasgos principales de la arquitectura tridimensional en términos teóricos en 1988, pero su modelo no se confirmó hasta 1989. Fue cuando Peter E. Wright determinó la estructura de un dedo de cinc de la proteína Xfin de *Xenopus*. Recurrió a la espectroscopía de resonancia magnética nuclear (RMN), una técnica que se utiliza para resolver la estructura tridimensional de pequeñas proteínas en solución. Le secundaron otros laboratorios, el nuestro incluido, en la identificación del mismo diseño en otras proteínas con dedos de cinc.

Como Berg pronosticó, la secuencia de aminoácidos característica del dedo de cinc se pliega en una forma compacta y crea dos subestructuras prominentes a todo lo largo. Una parte de la secuencia (correspondiente a la mitad izquierda de una protuberancia vertical) adopta la figura de una "hoja" beta. La hoja se forma cuando una cadena beta se pliega sobre la otra cadena beta. La parte restante de la secuencia (la mitad "derecha") se retuerce en una hélice alfa. Las dos cisteínas se alojan en la porción inferior de la hoja beta y las dos histidinas en la porción inferior de la hélice. Los cuatro aminoácidos permanecen unidos gracias a un átomo de cinc, cuya función fundamental es mantener juntas la hoja beta y la hélice.

El análisis por RMN ayudaba también a esclarecer el papel de ciertos aminoácidos. Cuando examinamos la secuencia del FTIIIA, observamos que los putativos dedos de cinc incluían una serie de tres aminoácidos hidrofóbicos, casi siempre en idénticas posiciones. (Las sustancias hidrofóbicas suelen asociarse en el inte-

rior de la proteína para "huir" del agua del medio.) Esa invariancia sugería un papel estructural importante para esos aminoácidos. Aun cuando en la representación lineal de la secuencia de aminoácidos esos residuos quedaban lejos unos de otros, pensamos que podían interaccionar en el espacio tridimensional y, por tanto, facilitar el plegamiento del minidominio. Tal como indicaba el modelo de Berg, los resultados de la RMN demostraban que, cuando el módulo del dedo de cinc se pliega, los aminoácidos hidrofóbicos quedan en estrecho contacto, lo que permite su interacción. Crean así un núcleo hidrofóbico que ayuda a mantener la forma del módulo.

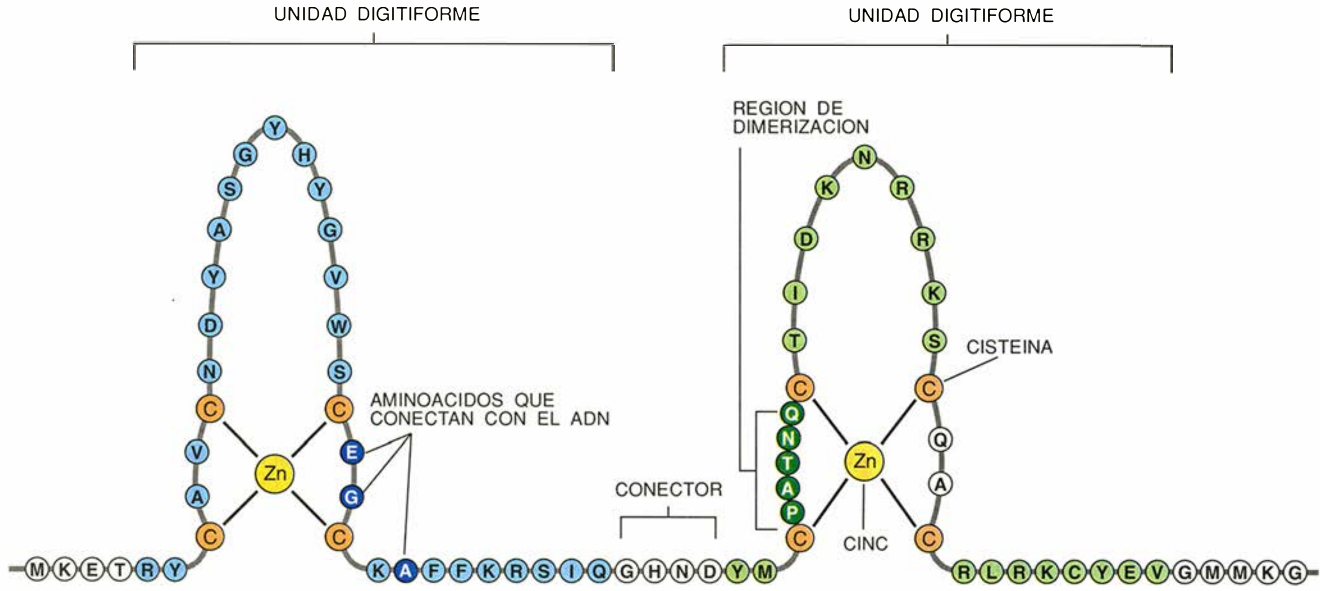
Algunos grupos teníamos en mente un problema más general. Muchos experimentos llevaban a la conclusión de que los dedos de cinc presentes en el FTIIIA, prácticamente toda la proteína, eran los únicos responsables de que el factor reconociese al promotor del gen del ARN 5S. Pero cada vez se descubrían más proteínas en las que sólo había unos pocos dedos de cinc insertos en una macroproteína. ¿Podían esos escasos dedos de cinc dirigir tales proteínas hacia los promotores, sin ayuda de otras partes de la proteína?

Para despejar el interrogante, nos centramos en un factor de transcripción de levadura con tres dedos de cinc, el SWITCH5 (SWI5). Con nuestro colega Kyoshi Nagai, aislamos la región que contiene los dedos y la pusimos en contacto con el promotor de su gen diana. La porción de proteína se engarzaba con avidez en el promotor, señal de que los dedos de cinc eran los únicos responsables de la unión al ADN. Encontramos también que, para que la proteína SWI5 se uniese con una fuerza razonable a su diana, se necesitaban al menos dos dedos de cinc juntos. Aplicando la técnica de la RMN a los dos primeros dedos del SWI5 confirmamos, con David Neuhaus y Yukinobu Nakeseko, que los dedos de cinc adyacentes no se fusionan entre sí. Son verdaderas "cabezas lectoras", unidas de manera independiente por conectores flexibles.

Quedaban por identificar, no obstante, los puntos precisos de contacto entre los dedos de cinc y el ADN. Nikola P. Pavletich y Carl O. Pabo dieron los pasos iniciales. Obtuvieron en primer lugar cristales del complejo formado por el ADN y el dominio de unión al ADN Zif268, un factor de transcripción. Con análisis de cristalografía de rayos X determinaron la estructura del complejo. Zif268, que igual que SWI5 contiene un grupo de tres dedos de cinc, participa en el desarrollo temprano del ratón.

Los análisis de rayos X revelaban que la región de Zif268 que contenía los dedos de cinc ceñía un segmento de ADN de una longitud cercana a una vuelta de hélice (más o menos formando una letra "C"), encajándose en el surco mayor. (El surco mayor es la más ancha de las dos "vaguadas" paralelas que rodean, en espiral, el eje longitudinal de la doble hélice de ADN.) Los contactos de los dedos con el ADN se establecen a través de secuencias sucesivas de tres pares de bases, y se orientan de forma similar con respecto al ácido nucleico. La hélice alfa de cada dedo apunta hacia el surco mayor, apoyándose en una de sus paredes.

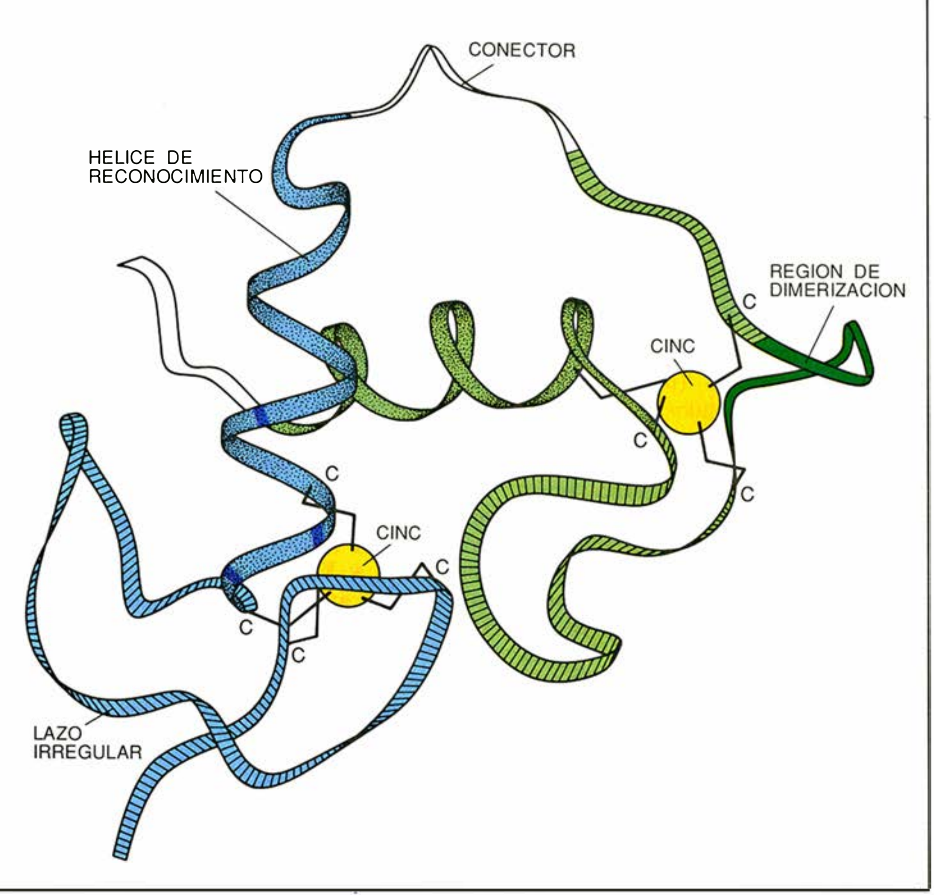
Los dedos primero y tercero de Zif268 se unen al ADN de un modo casi idéntico: un aminoácido de la primera vuelta de la hélice alfa contacta con el primer par de bases del correspondiente sitio de unión en el ADN, y un aminoácido de la tercera vuelta de hélice contacta con el tercer par de bases del mismo sitio de unión. El segundo dedo establece también dos contactos a través de la hélice alfa, pero esta vez los aminoácidos de la primera y segunda vuelta se traban con los pares de bases primero y segundo del correspondiente sitio de unión. (En cada caso, un aminoácido se ancla en una de las bases del par.) Además, la hélice alfa y la hoja beta del dedo se enlazan con los grupos fosfato de la cadena de azúcar y fosfato que conforman cada uno de los dos "largueros" de la escalera que es el ADN. Estos ligámenes adicionales ayudan a estabilizar el engarce del dedo de cinc con el ADN.



3. DOMINIO DE UNION AL ADN del receptor de estrógenos (un factor de transcripción que debe unirse primero al estrógeno para activar un gen). Su secuencia de aminoácidos (*letras mayúsculas*) está representada por dos unidades que se asemejan a dedos de cinc (*regiones azul y verde*). Esta estructura movió a pensar que las dos unidades, igual que los clásicos dedos de cinc, reconocían secuencias de bases independientes en el ADN. En realidad, sólo los tres aminoácidos coloreados en azul oscuro interaccionan con el ADN. Ello quiere decir que la primera estructura digitiforme es la que hace el contacto principal con el ADN. La segunda unidad tiene una función distinta: porta cinco aminoácidos (*verde oscuro*) que determinan que la molécula del receptor forme un dímero con una segunda molécula de receptor. Este emparejamiento es necesario para que el receptor del estrógeno se una con precisión al ADN.

Dominio de unión al ADN del receptor de estrógenos

La estructura del dominio de unión al ADN del receptor de estrógenos se aclaró en 1990, gracias al trabajo de Daniela Rhodes, John W. R. Schwabe y David Neuhaus. Acotaron las partes de la estructura tridimensional que realizan las funciones críticas de reconocimiento del ADN y emparejamiento con otra molécula del receptor. Las dos unidades del dominio (*azul y verde claros*) adoptan conformaciones similares. Un bucle irregular (*rayado*) que incluye dos cisteínas (C) es seguido de una hélice alfa (*espiral punteada*) donde están las otras dos cisteínas. Las cisteínas atrapan al cinc (*amarillo*), quedando sujetos a la base de la hélice los segmentos terminales de la región irregular. Así plegadas, las dos unidades se encajan a través de sus hélices. Los aminoácidos responsables del reconocimiento de las bases específicas (*azul oscuro*) están en la hélice de la primera unidad. Los responsables de que se forme el dímero (*verde oscuro*) se hallan en el bucle irregular de la segunda unidad.



Hasta la fecha, la cristalografía de rayos X no ha resuelto ningún otro complejo de dedos de cinc-ADN. Pese a lo cual, Grant H. Jacobs ha recabado pruebas que sugieren que muchos dedos de cinc se unen al ADN a la manera de Zif268: tras comparar la secuencia de aminoácidos de más de 1000 dedos de cinc, observó una notable variación entre los aminoácidos presentes en tres sitios determinados, justamente los sitios que utiliza Zif268 para establecer contactos, esto es, los ubicados en la 1.ª, 2.ª y 3.ª vuelta de la hélice alfa. Esa circunstancia avala la esperanza de que podamos diseñar módulos con dedos de cinc capaces de reconocer secuencias de ADN seleccionadas, de obvio interés en el estudio de la regulación génica y en medicina.

Ni que recordar tiene que existen límites a la extrapolación del modelo de Zif268 y de los análisis estadísticos. Cabría esperar que las proteínas con muchos dedos de cinc interaccionen con el ADN de forma algo distinta. En efecto, si el patrón de unión de Zif268 se aplicase a FTIIIA, esta proteína, dotada de nueve dedos, ceñiría el ADN en una extensión equivalente a tres vueltas de hélice, como un hilo sobre un carrete. Semejante envoltura, tan fuerte, podría impedir que el factor se soltase del ADN cuando se lo requiriese; los datos de "huellas moleculares" obtenidos por varios grupos, entre ellos el nuestro, sugieren, en efecto, que el FTIIIA no se arrolla sin solución de continuidad a lo largo del ADN.

Casi con toda seguridad, los primeros tres dedos del TFIIIA se aprietan en una sola vuelta de hélice del ADN, y es muy probable que los tres últimos hagan lo mismo. Pero el grueso de la proteína se sitúa en una cara de la doble hélice. Por tanto, la proteína cruza el surco menor, más estrecho, al menos dos veces. La variedad de patrones de unión con el ADN que existe entre regiones distintas del FTIIIA refleja otra diferencia, a buen seguro: la diversidad que reina entre secuencias de aminoácidos de los dedos de cinc del TFIIIA, superior a la disparidad entre ésta y las secuencias de los dedos de las proteínas tipo Zif268.

Desde una perspectiva evolutiva, hay una buena razón para pensar que los dominios de unión al ADN con muchos dedos surgieron por duplicación de algún gen ancestral que cifraba una proteína de una treintena de aminoácidos; proteína que bien pudo ser una de las primeras en evolucionar. Una proteína así habría sido fácil de producir; sintetizada, podría atrapar cinc (un metal bastante inerte) de sus alrededores con facilidad y seguridad, y se plegaría sin ninguna ayuda, adoptando una configuración estable. Una vez plegada, adquiriría la capacidad de unirse al ADN o al ARN. En ese marco hallaría fácil explicación la abundancia de dedos de cinc en los reinos animal y vegetal. Cualquier secuencia que adquiriese la determinación genética de un dedo con autonomía para plegarse, conseguiría instantáneamente la capacidad de unirse a un nuevo segmento de ADN. Dicha propiedad originaría nuevas funciones celulares, como transcribir genes silenciados y codificar, por ende, una enzima nueva o cualquier otra proteína de interés.

Mientras ahondábamos en la estructura y función de los dedos de

cinc clásicos, se realizaron algunos experimentos que venían a sugerir que el motivo inicialmente descubierto en FTIIIA no era la única estructura relacionada con el cinc dedicada al reconocimiento del ADN.

En 1987 se determinaron las secuencias de aminoácidos de varios miembros de una extensa familia de factores de transcripción: los receptores nucleares de hormonas. Estos factores han de unirse a un esteroide, hormona tiroidea o vitamina antes de actuar como activadores génicos. El análisis de las secuencias mostró que todas ellas contenían un dominio conservado (muy similar), de unos 80 aminoácidos. El dominio incluía dos, y siempre dos, unidades cuya secuencia de aminoácidos recordaba a los dedos de cinc. Igual que en éstos, cada unidad o motivo alojaba dos parejas de aminoácidos con capacidad potencial para atrapar cinc. En este caso, sin embargo, eran sólo cisteínas. Por el parecido de las secuencias con los dedos de FTIIIA cabía suponer que el segmento de 80 aminoácidos rico en cisteínas presente en tales factores era el dominio de unión al ADN.

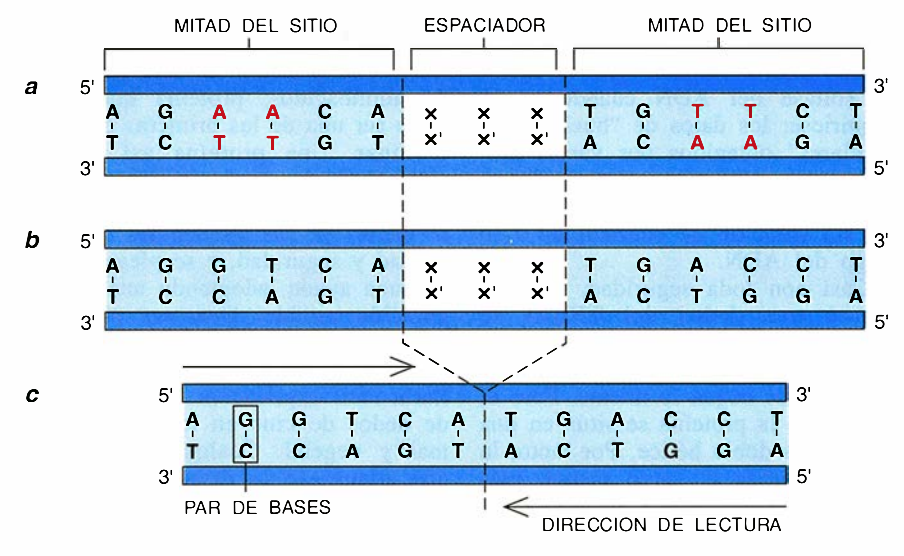
Pierre Chambon y Stephen Green confirmaron la hipótesis a finales de los ochenta. Poco tiempo después, los equipos de Paul B. Sigler y Keith R. Yamamoto establecieron que cada segmento del dominio de unión al ADN incorporaba un átomo de cinc. Era, pues, de esperar que las configuraciones de los dos motivos se parecieran, lo mismo que en los dedos de cinc del tipo FTIIIA, y que generaran módulos independientes de unión al ADN.

Pero la suposición resultó ser errónea en parte. Los análisis estructurales acabaron por evidenciar el plegamiento similar de las dos subunidades. Mas ya antes la bioquímica había mostrado que las subunidades no actuaban como cabezas lectoras independientes. Chambon y los equipos de Ronald M. Evans y Gordon M. Ringold realizaron experimentos en los que sustituían unos aminoácidos por otros y a continuación examinaban el efecto de dicha sustitución sobre la unión al ADN; descubrieron que el primer motivo operaba a modo de unidad de reconocimiento primario del ADN. Por aquel entonces, Evans y Kazuhiko Umesono, de nuevo aplicando el método de la sustitución, descubrieron al menos una función para el segundo motivo. Para entender esa función, hemos de traer aquí ciertas ideas generales sobre la interacción entre el ADN y los receptores de esteroides.

Esos receptores se unen al ADN en parejas de moléculas idénticas. Cada proteína del dímero reconoce una mitad del sitio de unión, que en conjunto es un palíndromo. Esto es, las dos mitades son idénticas leídas en un sentido y en su contrario, en cadenas de ADN antagónicas. La secuencia de bases del sitio reconocido por un tipo de factor de transcripción (el receptor del estrógeno) puede ser idéntica a la que reconoce otro factor (el receptor de la hormona tiroidea). La única diferencia entre los dos sitios de unión estriba en el número de pares de bases que separa las dos mitades que constituyen el palíndromo.

Por tanto, para que un factor de transcripción encuentre el sitio por donde anclarse al ADN, la proteína debe contener regiones encargadas de reconocer dos regiones con secuencias de bases específicas y de medir la distancia que existe entre esas dos regiones. Evans y Umesono descubrieron que una parte del segundo motivo es la encargada de medir la longitud del espaciador.

Para explicar cómo se produce el reconocimiento importa conocer la configuración tridimensional de los dominios de unión al ADN y ver así en qué parte de la estructura se hallan los aminoácidos involucrados. En 1990, el grupo de Robert Kaptein resolvió, por RMN, la estructura del dominio de unión al ADN del receptor de glucocorticoides (cortisona) de ratas. Poco después, John W. R. Schwabe y Neuhaus, junto con uno de los autores (Rhodes), resolvieron la del receptor de estrógenos humano.



4. SITIOS DE ANCLAJE EN EL ADN, o elementos de respuesta, reconocidos por los receptores de glucocorticoides (*a*), estrógenos (*b*) y hormonas tiroideas (*c*). Están formados por dos mitades (*regiones sombreadas*), que son idénticas si se leen los pares de bases (*letras unidas por trazos*) en cadenas opuestas (*flechas en c*) y en dirección de 5' a 3'. Los receptores se unen a estos elementos de respuesta a modo de dímeros. Cada miembro de la pareja se une a una de las mitades. Para que la unión sea correcta, el receptor debe reconocer por una parte la secuencia de bases y por otra el intervalo que media entre las dos mitades. Las diferencias entre los distintos elementos de respuesta pueden ser muy sutiles. Los elementos *a* y *b* sólo se diferencian en dos pares de bases (*letras rojas*) y *b* y *c* en el tamaño del espaciador.

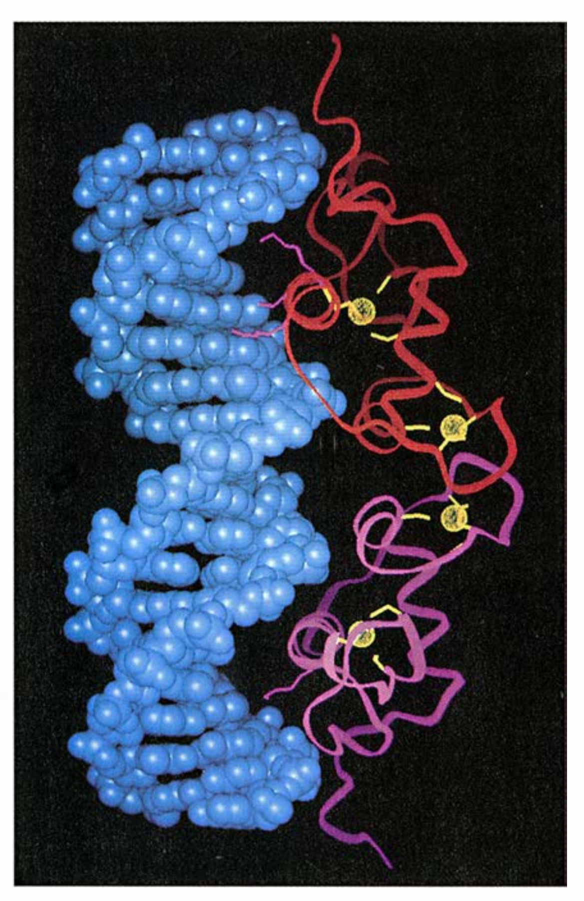
Los dominios de unión al ADN de ambos receptores adoptan casi la misma configuración. Uno y otro motivo digital inscritos en el dominio constan de dos partes: un segmento de aminoácidos en bucle irregular (en vez de la hoja beta de los dedos de cinc clásicos), seguido por una hélice alfa. El bucle porta dos de los sitios de unión con el cinc; los otros dos están al comienzo de la hélice que le sigue. Pero los dos motivos no están separados, sino que aparecen fusionados en una sola unidad estructural. Las hélices se cortan perpendicularmente por sus puntos medios, una configuración creada por la atracción mutua de aminoácidos hidrofóbicos invariantes del todo o bastante.

Conocida la estructura tridimensional del dominio de unión al ADN, procedimos a acotar aquellos aminoácidos que, según sabíamos, eran críticos para reconocer al ADN. Grupos dirigidos por Chambon, Evans y Ringold habían identificado tres aminoácidos en el primer motivo digitiforme que eran responsables del reconocimiento de una de las dos mitades del sitio de unión. Resultó

que esos aminoácidos residían en un lateral de la hélice del motivo, subestructura que pasó a llamarse "hélice de reconocimiento del ADN". ¿Qué decir de la función del segundo motivo? Al cruzar la hélice de reconocimiento del primer motivo, la hélice del segundo se constituía en punto de apoyo para mantener en su lugar a la hélice de reconocimiento. La separación de funciones entre los dos motivos sugiere que el segundo dedo apareció por duplicación del primero; una vez formado, la selección le asignó nuevas tareas.

La cartografía tridimensional nos reveló también el modo en que el segundo motivo mide la espaciación entre las dos secuencias que conforman el sitio de unión. Evans y Umesono establecieron que los aminoácidos responsables de esa misión se hallan entre las primeras dos cisteínas del segundo motivo. En la configuración tridimensional, tales aminoácidos quedan en el bucle que precede a la hélice, listos para servir de enlace entre las dos moléculas del dímero.

El modelo obtenido por computador de la interacción entre ADN y regiones de unión al ADN de los receptores de glucocorticoides y estrógenos nos permitió comprobar, a Kaptein y a nosotros, respectivamente, que la unión de la forma predicha entre las dos proteínas orientaría al dímero. Las dos hélices de reconocimiento del dímero se dispondrían de suerte tal, que el intervalo espacial entre ellas se correspondería con el hiato entre los dos hemisitios del ADN.



5. COMPLEJO ADN-RECEPTOR mediado por los dominios de unión al ADN (*cintas roja y magenta*) de una pareja de receptores de glucocorticoides. Una hélice alfa (*espiral*) de cada dominio establece los contactos (*líneas finas magenta*) con bases de una de las caras de la doble hélice. La imagen se inspira en un análisis de cristalografía de rayos X realizado por Ben F. Luisi y Paul B. Sigler, de la Universidad de Yale.

Sigler y Ben F. Luisi, de Yale, junto con Yamamoto y Leonard P. Freedman, de San Francisco, han confirmado ya esta predicción por cristalografía de rayos X. Han averiguado también que cada proteína del dímero establece varios engarces con los fosfatos de ambos lados del surco mayor. Gracias a dichos anclajes, la hélice de reconocimiento puede profundizar en el surco mayor y formar enlaces con algunos pares de bases del hemisitio de unión. Las investigaciones sobre los dedos de cinc de los receptores nucleares de hormonas indican que, a pesar de algunas semejanzas estructurales con los dedos de cinc del tipo FTIIIA, esos motivos se parecen más, desde el punto de vista funcional, a los motivos de reconocimiento del ADN de otros factores de transcripción, como la hélice-giro-hélice y las cremalleras de leucina. Esto es, plegándose unos con otros, los motivos contribuyen a que los receptores de hormonas nucleares formen los dímeros que permiten a dichos factores reconocer sus sitios de unión específicos en el ADN.

El conocimiento de la estructura y función de una molécula es el punto de partida para pensar en su aplicación médica. En el asunto que nos ocupa, sabemos que cierto cáncer renal, el tumor de Wilm, tiene su origen en una mutación genética que entorpece la unión al ADN de determinado dedo de cinc. Algunos de los síntomas que revelan una ingestión insuficiente de ese metal en la dieta, como el retraso en el desarrollo sexual, pueden ahora atribuirse a la imposibilidad que tienen los receptores de estrógenos y andrógenos de plegarse adecuadamente en ausencia de cinc.

Los dos tipos de dedos que hemos analizado difieren en su estructura y en su interacción con el ADN. Aparecerán, sin duda, otras variedades de proteínas con dedos de cinc. Cada vez se conocen más secuencias de aminoácidos que incluyen lo que parecen ser motivos con dedos de cinc, aunque las distancias entre las parejas de cisteínas o histidinas, o el número de parejas, difieren de las supuestas normales. Un ejemplo insólito es la proteína GAL4 de levaduras. Contiene seis cisteínas que se pliegan alrededor de dos átomos de cinc. Esperamos también encontrar dedos de cinc, o similares, implicados en funciones alejadas de la transcripción, como el transporte, maduración o cualquier proceso que implique una acción sobre el ADN, o incluso el ARN. No se olvide que el FTIIIA se une lo mismo a uno que a otro. Nos queda aún mucho que aprender.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

REPETITIVE ZINC-BINDING DOMAINS IN THE PROTEIN TRANSCRIPTION FACTOR IIIA FROM *XENOPUS* OOCYTES. J. Miller, A. D. McLachlan y A. Klug en *EMBO Journal*, vol. 4, n.º 6, págs. 1609-1614, 1985.

ZINC FINGERS: A NOVEL PROTEIN MOTIF FOR NUCLEIC ACID RECOGNITION. Aaron Klug y Daniela Rhodes en *Trends in Biochemical Sciences*, vol. 12, n.º 12, págs. 464-469, diciembre de 1987.

ZING FINGER–DNA RECOGNITION: CRYSTAL STRUCTURE OF A ZIF268-DNA COMPLEX AT 2.1 Å. Nikola P. Pavletich y Carl O. Pabo en *Science*, vol. 252, págs. 809-817; 10 de mayo de 1991.

BEYOND ZINC FINGERS: STEROID HORMONE RECEPTORS HAVE A NOVEL STRUCTURAL MOTIF FOR DNA RECOGNITION. John W. R. Schwabe y Daniela Rhodes en *Trends in Biochemical Sciences*, vol. 16, n.º 8, págs. 291-296; agosto de 1991.

CRYSTALLOGRAPHIC ANALYSIS OF THE INTERACTION OF THE GLUCOCORTICOID RECEPTOR WITH DNA. B. F. Luisi, W. X. Xu, Z. Otwinowski, L. P. Freedman, K. R. Yamamoto y P. B. Sigler en *Nature*, vol. 352, n.º 6335, págs. 497-505; 8 de agosto de 1991.

A STRUCTURAL TAXONOMY OF DNA-BINDING DOMAINS. Stephen C. Harrison en *Nature*, vol. 353, n.º 6346, págs. 715-719; 24 de octubre de 1991.

John Horgan

LINUS C. PAULING: *por delante de su tiempo*

No crea distancias. Sus traviesos ojos azules y sus mejillas sonrosadas cuadran bien con su papel de abuelo sabio y bonachón. Linus C. Pauling, de 92 años cumplidos, tiene 15 nietos e igual número de bisnietos.

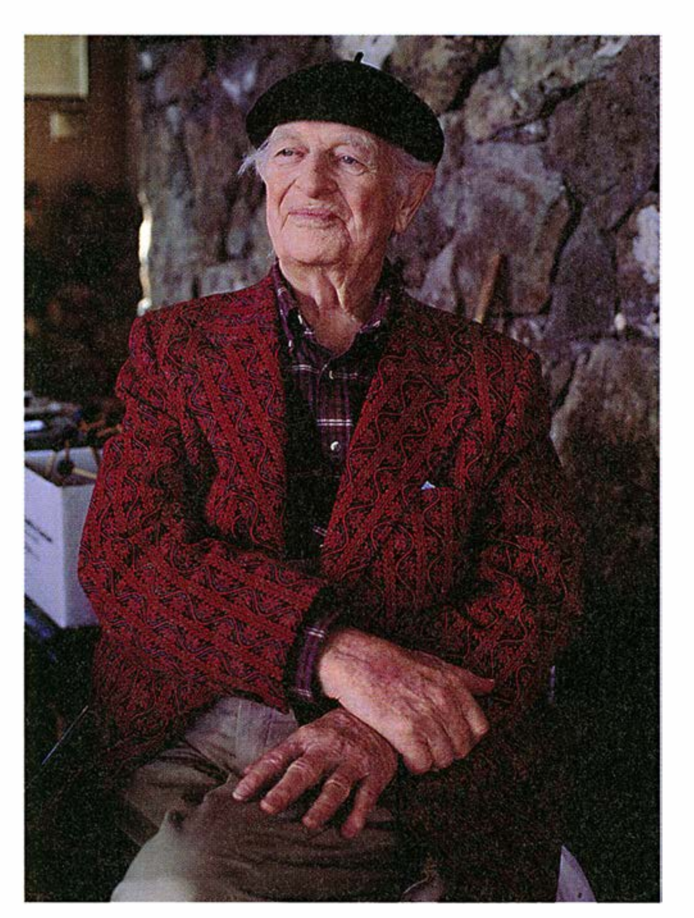
Sólo cuando habla, con la precisión implacable de un fiscal, revela Pauling la intensidad que ha caracterizado su carrera, tan larga y productiva.

Salta a la vista cuán alto es su concepto de sí mismo, y cuánta fuerza le da ello. La suerte, resalta, raramente intervino en sus descubrimientos científicos. "Mi éxito como científico ha sido en gran medida el resultado de unos conocimientos más amplios que los de la mayoría, en particular de mi dominio de la química y mi soltura en física y matemáticas."

Pauling no sólo contribuyó a sentar los cimientos de la química moderna, sino que ha construido gran parte del edificio. Teórico y experimentalista eximio, reformuló la química en el marco de la mecánica cuántica y fue pionero en las técnicas que descifran la estructura interna de las moléculas, como la difracción de rayos X y de electrones. Pauling ha recibido muchas distinciones, entre ellas el premio Nobel de química.

Sin embargo, a quien por antonomasia es autoridad científica se le conoce hoy más por sus campañas contra corriente. Su oposición al desarrollo de las armas nucleares en Estados Unidos durante los años más gélidos de la guerra fría provocó que se le tachara de simpatizante del comunismo. Durante casi tres décadas, además, Pauling ha plantado batalla a la guardia pretoriana de la biomedicina con sus ideas acerca de la vitamina C y otros nutrientes.

La lucha continúa. Recientes estudios han demostrado que una dieta rica en vitaminas —y en vitamina C en particular— está asociada a una menor exposición a las enfermedades y a una mayor esperanza de vida. Estos hallazgos han desatado un súbito interés periodístico por Pauling. Los escépticos advierten que no se ha demostrado que haya una relación causa-efecto entre las vitaminas y la resistencia a las enfermedades, ni que las dosis hayan de ser las defendidas por Pauling (toma 18 gramos de vitamina C cada día).



LINUS PAULING es el único científico que ha sido galardonado con dos premios Nobel no compartidos, el de química en 1954 y el de la paz en 1962.

El Instituto Linus Pauling de Ciencia y Medicina de Palo Alto (California), institución sin ánimo de lucro que fundó en 1973 para la investigación de sus teorías sobre las vitaminas, sufre desde hace años estrecheces económicas. Pauling descubrió hace un año que tiene cáncer de próstata. Insiste en que el cáncer "se retrasó 20 o 25 años gracias a mi elevada ingesta de vitaminas". Si no alcanza su meta de llegar a los 100 años, la razón será, dice, por haber empezado a tomar megadosis hace sólo 27 años.

Ante la pregunta de si le molesta que todavía haya de luchar tan duramente por el reconocimiento y el prestigio, Pauling se encoge de hombros. "Estoy acostumbrado a que reciban mis ideas con escepticismo", contesta. Sugiere, recordando una frase del eminente biólogo René Dubos, que quizás el problema esté en los veinte años que le lleva siempre a su tiempo. Viene entonces otra cita: su esposa, Ava, que murió en 1981, solía decir que "soy demasiado cabezota para cambiar mis ideas sobre algo cuando me aprietan para que lo haga".

Su pasión por la ciencia y su enorme confianza en sí mismo se manifestaron desde muy pronto. Pasó la niñez en Oregón; devoraba libros de mineralogía, química y física. "No paraba de darle vueltas a las propiedades de los materiales: por qué unas sustancias estaban coloreadas y otras no, por qué había minerales o compuestos inorgánicos duros y otros blandos", dice.

Ingresó en el Instituto de Tecnología de California. En tres años consiguió el doctorado en química física y "un sentimiento de confianza en mis propias ideas". Se dirigió a Europa en 1926, y se zambulló inmediatamente en la mecánica cuántica, que se

hallaba aún en su infancia. "En 1926 publiqué el primer artículo en el que se aplicaba la mecánica cuántica a sistemas con más de un electrón." A finales de los años veinte, sostiene, él era "la única persona del mundo que a la vez comprendía bien mecánica cuántica y tenía amplios conocimientos de química".

Una vez de vuelta, en 1927, al Caltech, donde permaneció hasta los años sesenta, Pauling creó una teoría cuántica del enlace químico. Uno de los conceptos clave que ideó fue el de resonancia: una molécula, al fluctuar entre dos estados diferentes, da lugar a un nuevo estado intermedio.

A finales de 1930 tenía la impresión de que "ya había bastantes que se ocuparan de la química inorgánica", y se centró en las moléculas con las que se hacen los seres vivos. Sus investigaciones sobre la hemoglobina desembocaron en una teoría de las proteínas nativas y desnaturalizadas que explica, por ejemplo, por qué la clara de huevo se convierte en gel cuando el huevo se pasa por agua.

En 1939 Pauling vertió sus conocimientos en uno de los textos científicos que más repercusión haya tenido, *La naturaleza del enlace químico y la estructura de moléculas y cristales*. Sus teorías no fueron universalmente aceptadas. Algunos científicos soviéticos proclamaron que la resonancia era incompatible con el materialismo dialéctico, y los hubo occidentales que deploraron la fundamentación de la teoría en estructuras moleculares cuya existencia no había sido probada.

Pero cuando los científicos ignoran las teorías de Pauling, se la juegan. Esta es la moraleja que se podría desprender de la rememoración que Pauling hace de su descubrimiento de la configuración helicoidal de las proteínas. Corría el año 1948; Pauling estaba perplejo por la estructura tridimensional de una proteína bastante común llamada queratina. Postrado en cama a causa de un resfriado, hizo un esquema de la molécula en un trozo de papel y lo empezó a doblar y a retorcer, tratando de encontrar una estructura que pudiera reproducir los resultados que había publicados tocantes a la refracción por rayos X. Pauling acabó por dar con un modelo helicoidal que daba cuenta de casi todos los datos, pero no de todos, y decidió no publicar sus resultados hasta que no resolviese la discrepancia.

Mientras tanto un grupo dirigido por W. Lawrence Bragg había publicado un artículo donde se proponía una estructura helicoidal diferente para las proteínas..., diferente, e incorrecta. Los físicos habían ignorado los hallazgos sobre las propiedades de los polipéptidos que Pauling había publicado hacía años. "¡No se habían leído mi libro!", exclama Pauling, aún atónito tantos años después. Pauling publicó la versión correcta de la hélice proteínica dos años después.

Pauling declinó participar en el Proyecto Manhattan. Pero dejando a un lado temporalmente sus inclinaciones pacifistas ("había que detener a Hitler"), supervisó el desarrollo de otras tecnologías militares: granadas perforantes de blindaje y una nueva clase de explosivos.

Por la noche, Pauling se pasa varias horas rastreando en revistas científicas en busca de "cosas que no entienda".

Tras la contienda, sin embargo, Pauling decidió que "evitar una catástrofe nuclear era tan importante, que tenía que poner de mi parte lo que me correspondiese". Denunció las armas nucleares. No tuvo crítico más severo que su esposa. Insatisfecha con una de sus conferencias, le advirtió que si no era capaz de abordar el asunto de la paz con la misma autoridad que demostraba en los temas científicos, mejor sería que lo dejase. Pauling, a partir de ese momento, se enfrascó en el estudio de la política internacional.

En los años cincuenta, durante la caza de brujas anticomunista del senador McCarthy, Pauling fue ásperamente atacado por sus puntos de vista, y el Departamento de Estado le retiró el pasaporte. Sólo en el último minuto le dio el gobierno autorización para que acudiese a recibir el Nobel de 1954. Pauling no se arredró lo más mínimo. Escribió *¡No más guerras!*, el mismo año de 1958 que organizó una petición de científicos contra las pruebas nucleares. Ganó el premio Nobel de la paz en 1962, y el mérito de que en buena medida se le debiese la prohibición de pruebas atómicas en la atmósfera que firmarían rusos y americanos al año siguiente.

En los años sesenta Pauling se metamorfoseó de nuevo, esta vez en profeta de las vitaminas. Su creencia en el valor de su consumo en grandes cantidades se basaba en trabajos propios anteriores sobre las dosis óptimas de los medicamentos. Mientras que la mayoría de los medicamentos se vuelven tóxicos a dosis elevadas, "me di cuenta de que las vitaminas son inocuas incluso en grandes cantidades".

Los estudios de Pauling le convencieron de que la dosis óptima de vitaminas era mucho mayor que la ingesta que se deriva de una dieta normal. Ha destacado la capacidad que la vitamina C tiene de resguardarnos contra enfermedades específicas, como el resfriado, el cáncer, y, más recientemente, el ataque de corazón. Pero sostiene que la vitamina C nos protege "prácticamente de todas las enfermedades".

Pauling recuerda que un especialista en nutrición que reseñó su libro *La vitamina C y el resfriado común*, de 1971, lamentaba que no hubiese seguido un curso de nutrición, pues "probablemente catearía el curso que les damos a los estudiantes de primer año". Aunque estas reticencias persisten en la comunidad biomédica, Pauling confía en que sus puntos de vista se verán finalmente refrendados. "Desde luego", añade, "yo diría que ya fueron confirmados hace mucho."

De una manera u otra, Pauling encuentra tiempo para la ciencia pura. Posee en Big Sur (California) un rancho de 60 hectáreas en una franja salvaje de costa, mirando al mar. En un día normal, Pauling se levanta antes del amanecer y trabaja hasta la tarde escribiendo artículos y cartas y haciendo cálculos. Tras ver las noticias de la noche, se pasa varias horas leyendo revistas científicas, "rastreando en busca de cosas que no entienda".

Una extraña forma de materia, los cuasicristales, captó la atención de Pauling hace casi una década. Al revés que la mayoría de los físicos, Pauling concluyó que la inhabitual simetría quíntuple de estos materiales proviene de un fenómeno cristalográfico convencional, llamado maclación. La amplia aceptación de que gozan explicaciones más exóticas, dice, es sintomática de un declive de índole más general de la cristalografía. "El cristalógrafo joven de hoy no piensa. Pone el cristal en el difractómetro automático, que está conectado al ordenador, que halla la estructura y que quizás esté conectado a otro sistema informático que escribirá el artículo, ¡qué se yo!"

A pesar de —o a causa de— las quejas de Pauling, "los de los cuasicristales no se toman en serio lo que digo". Sonríe.

Ciencia y sociedad

Celtiberia

El bronce de Botorrita

La ciudad antigua de *Contrebia Belaisca* (Botorrita, Zaragoza) constituye un punto de referencia fundamental en los estudios celtibéricos. Se trata de uno de los pocos yacimientos con niveles de los siglos III a I a. C. —sin duda la fase más compleja y mejor documentada por escrito de la historia celtibérica— que ha sido excavado en una extensión significativa; y se ha hecho con resultados notables, como lo confirma la exhumación en la parte alta de la ciudad de un gran edificio público de adobe con cinco naves en planta precedido por una impresionante acumulación de columnas.

Botorrita ha proporcionado, además, hallazgos epigráficos del máximo interés. Al margen de una serie de inscripciones menores (grafitos de propiedad sobre cerámica, marcas de artesano sobre las columnas del gran edificio público o el epígrafe fragmentario sobre una laminilla de bronce), destacan el "bronce de Botorrita" y la "tabula Contrebiensis" —ésta en latín—, a los que ahora se ha añadido un nuevo epígrafe en lengua celtibérica que, por sus dimensiones, ha levantado revuelo entre los círculos especializados: el "gran bronce de Botorrita".

Se trata de una placa de bronce de 48 por 77 centímetros y 6 milímetros de grosor encontrada el pasado mes de octubre de forma casual, si bien en un contexto arqueológico durante los trabajos preparatorios para colocar una cubierta destinada a proteger la parte central del yacimiento. Se conserva en dos grandes fragmentos, que cubren tres cuartas partes de la inscripción, y en otros más pequeños correspondientes al ángulo superior derecho.

La pieza, depositada en el Museo de Zaragoza, se está analizando para precisar su estado de conservación y la composición del soporte (gammagrafía, fluorescencia por rayos X, análisis metalográficos, etc.). Terminada esa tarea se limpiará y restaurará. Sólo después podrá acometerse la transcripción y lectura del texto que ha sido encomendada a un equipo multidisciplinar, encabezado por Antonio Beltrán, de la Universidad de Zaragoza, director de las excavaciones desde los años setenta, e integrado además por la halladora material del epígrafe, M. Antonia Díaz, por los lingüistas Javier de Hoz y Jürgen Untermann, de las Universidades Complutense y de Colonia, y por quien subscribe.

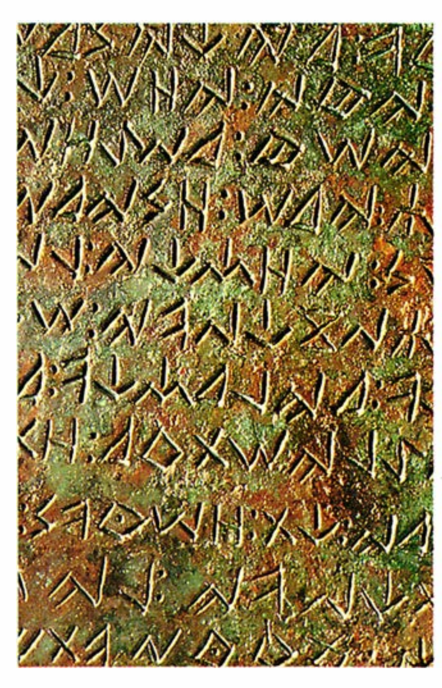
Desde el punto de vista formal, la placa, de la que se conservan los agujeros de sujección, presenta una escritura muy cuidada, realizada no por incisión, sino mediante punteado, y delimitada por líneas dobles de pautado. Del texto apenas resultan legibles algunas palabras que bastan, cuando menos, para asegurar que está redactado en escritura ibérica y lengua celtibérica, pero que no permiten todavía emitir un juicio de valor fundamentado sobre la importancia real del epígrafe. De cualquier forma, todo induce a pensar que el texto ocupa la inmensa mayoría de la superficie del bronce, lo que significa, según los cálculos menos optimistas, un mínimo de medio millar de palabras, quizá más. Las dimensiones de la pieza y el cuidado con el que ha sido labrada la inscripción mueven a suponer que se trata de un importante documento de carácter legal, como sus modelos romanos.

En el estado actual de los estudios célticos en general y celtibéricos en particular, el interés de esta pieza es ante todo de carácter lingüístico y se apoya en la insólita extensión del texto que presumimos que contiene.

La parte occidental de Europa, desde Irlanda al Danubio y desde el Sur de Alemania hasta la Península Ibérica, estaba poblada antes de la



Edificio público de adobe de Contrebia Belaisca, Botorrita.



Detalle del bronce de 1970.

expansión romana por pueblos de habla céltica, cuyo rasgo común más evidente, al menos desde nuestra perspectiva histórica, era la lengua. Esta cultura, muy heterogénea, fue barrida del continente por la acción sucesiva de Roma primero y de los pueblos germánicos después, de forma que a comienzos de la Edad Media la lengua céltica sólo se conservaba en las Islas Británicas y en la Bretaña francesa.

A partir del siglo VII conservamos una literatura céltica bastante rica, redactada en las diversas lenguas empleadas en las islas (de ahí el nombre de celta insular con el que se les conoce); sin embargo, del celta que se hablaba durante la Antigüedad en el continente (el llamado celta continental) sólo tenemos constancia a través de la onomástica conservada en la toponimia y en las fuentes clásicas, y sobre todo a través de las inscripciones que los propios celtas realizaron.

Más allá de su interés lingüístico, estas inscripciones revisten una gran importancia histórica, pues constituyen la única documentación escrita directa que conservamos de esta cultura. Las demás referencias disponibles proceden de autores griegos o latinos y están mediatizadas por su concepción de estos pueblos, a los que consideraban bárbaros y a los que con frecuencia miraban con franca hostilidad.

Los celtas no desarrollaron un sistema propio de escritura (con excepción del tardío sistema ogámico de Irlanda), sino que adoptaron los de sus vecinos mediterráneos etruscos, griegos o íberos, y finalmente, el alfabeto latino de los romanos. En el norte de Italia los lepónticos asumieron el alfabeto etrusco ya hacia el siglo VII. Sin embargo, la escritura no se hizo frecuente entre los pueblos celtas periféricos del Mediterráneo occidental hasta los siglos II y I a. C., centurias en las que los galos del sur de Francia utilizaron el alfabeto griego de los helenos de Marsella y los celtíberos de Hispania tomaron la escritura ibérica de sus vecinos orientales.

Conservamos muy pocos epígrafes, que además son de breve extensión; rara vez superan la docena de palabras, de las que la mayoría son nombres personales. En estas condiciones el estudio del celta antiguo o continental (es decir, del lepóntico, del galo y del celtibérico), atestiguado de forma tan escueta y parcialmente comprensible sólo a través de comparaciones con las lenguas célticas insulares, bastante diferentes y casi un milenio posteriores, encuentra dificultades.

Los textos más largos conocidos hasta ahora son galos y celtibéricos. Entre los galos, de fecha tardía y redactados ya en alfabeto latino, destacan, por un lado, el calendario de Coligny, una gran placa de bronce de 90 por 150 cm, datada en el siglo II d. C. y conservada en estado muy fragmentario; acorde con su carácter, consiste fundamentalmente en cifras y nombres de meses y festividades, circunstancia que hace de ella un precioso documento religioso, pero de escasa utilidad lingüística; y, por otro, las láminas de plomo de Larzac y Chamalières, de carácter seguramente mágico, datables hacia el siglo I d. C., que constan de unas 160 y 60 palabras, respectivamente.

Entre los celtibéricos, el único documento de gran extensión conocido hasta octubre de 1992 era el "bronce de Botorrita": una placa de 10 por 40 cm, redactada en escritura ibérica por las dos caras, y aparecida en 1970 en el curso de las excavaciones realizadas en una casa de planta romana situada en la parte baja de la ciudad; su datación, puesto que apareció en los niveles de destrucción del yacimiento fechados hacia el 70 a. C., debe situarse a comienzos del siglo I a. C. o, a lo sumo, a fines del II. Hasta la aparición del "gran bronce", éste era el documento más largo en celta antiguo con cerca de 180 palabras, si bien una tercera parte de ellas, correspondientes al texto de la cara B, forman una lista de nombres propios de persona. Su interpretación es todavía discutida, si bien hay unanimidad en considerar que se trata de un documento legal (una disposición de tipo religioso para unos, un acuerdo entre dos ciudades a propósito de ciertos edificios para otros), pues éste es el carácter de los documentos romanos sobre bronce que le sirvieron de modelo y que, en época republicana, servían de soporte para decretos de magistrados, decisiones del senado o regulaciones municipales entre otros documentos.

En estas circunstancias puede comprenderse la importancia del nuevo hallazgo que, con sus cerca de quinientas palabras, constituye el texto más largo conocido hasta la fecha en celta continental y que, si las expectativas creadas no se ven defraudadas tras la limpieza del bronce, permitirá dar un paso de gigante en el conocimiento del celtibérico y, por ende, del celta continental. (Francisco Beltrán Lloris, de la Universidad de Zaragoza.)

Nuevos materiales

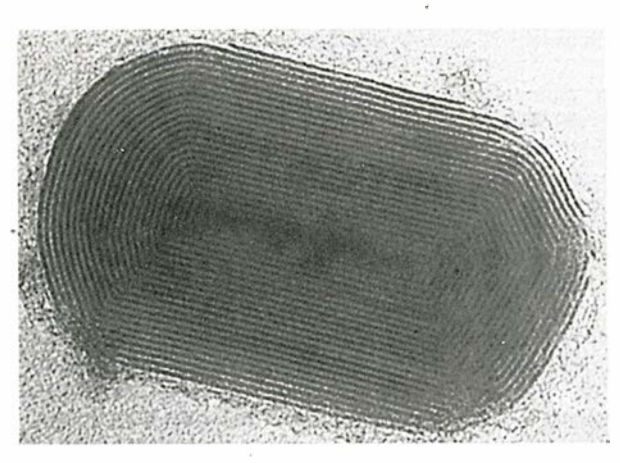
Seudofullerenos

Desde que se confirmó hace dos años la existencia de la jaula icosaédrica de carbono a la que se dio el nombre de buckminsterfullereno, está por todas partes. Aparecieron jaulas de carbono de cierto tamaño, jaulas anidadas (muñecas rusas) y fibras ultrafinas ("buckytubos"). Les siguieron los metalofullerenos, híbridos que enjaulan átomos metálicos o los incorporan en la propia red de carbono. Acaba ahora de anunciarse la síntesis de una envoltura que no está hecha de carbono: una jaula anidada de disulfuro de tungsteno.

Los seudofullerenos hicieron acto de presencia en julio de 1991, en el Instituto Weizmann de Israel, donde Reshef Tenne, Lev Margulis, Menachem Genut y Gary Hodes preparaban disulfuro de tungsteno para células solares de alto rendimiento. No cayeron inmediatamente en la cuenta de la importancia de las esferas anidadas de material semiconductor que obtuvieron. "Observamos las muñecas rusas en julio de 1991", dice Tenne, "pero no atamos cabos hasta que no vimos las fotografías que hizo Iijima." (Sumio Iijima, de la Corporación NEC, describió los buckytubos anidados a finales de ese mismo año.)

Los técnicos del Weizmann afirman que sus "buckyestructuras" de pega son estables al menos durante un año. Sin embargo, por fácil que sea conservarlas, nadie las ha producido en gran cantidad hasta ahora. Como sus arquetipos de carbono, los seudofullerenos se forman a altas temperaturas. En esas condiciones, el vapor de disulfuro de tungsteno se condensa en una lámina bidimensional, como hacen los precursores en carbono de los fullerenos. Algunas celdas hexagonales se convierten entonces en pentágonos, causando que la lámina se curve sobre sí misma y se cierre.

¿Qué maravillas no harían estas motas si se las produjese por gramos? "Supongo que mostrarían efectos fotoconductores y cuánticos", afirma Tenne. Se cree que las jaulas de disulfuro de tungsteno más pequeñas tienen un intervalo de energía entre bandas electrónicas mucho menor que 1,6 eV. "Al aumentar el número de capas", observa Tenne, "el intervalo debería acercarse a ese valor". Por ello, los expertos en materiales esperan llegar a controlar el crecimiento de estas estructuras y "sintonizar" su intervalo entre ban-



El fulleroide sin carbono está formado por jaulas anidadas de disulfuro de tungsteno.

das de manera que tengan propiedades electrónicas específicas. Se podría, por ejemplo, sintonizar muñecas rusas para que absorbiesen óptimamente la luz solar, con lo que se tendrían mejores células solares. Aún más atractiva es la posibilidad de sintonizar el disulfuro de tungsteno para que emita luz visible. Este material no sirve en masa para ello, porque, como el silicio, es un semiconductor de intervalo indirecto en el que los electrones y las cargas positivas, o huecos, no se recombinan normalmente para generar luz.

Se insinúan otras posibilidades. El disulfuro de tungsteno se utiliza como lubricante en algunas aplicaciones aeroespaciales. Si retuviese esta propiedad en su forma fulleroide, podría engrasar las nanomáquinas del mañana. Se podría, por ejemplo, depositar diminutas bolas de grasa en un cojinete microscópico o en el interior de una minúscula junta de rótula. También podrían intercalarse litio y "buckytubos" de pega, y formar pilas recargables microscópicas.

Soles jóvenes

Descubiertos por nuevas técnicas telescópicas

Stephen y Karen M. Strom, de la Universidad de Massachusetts en Amherst, en colaboración con K. Michael Merrit, del Observatorio Nacional de Kitt Peak, han obtenido imágenes que revelan aspectos de la formación estelar hasta ahora nunca vistos. Hay también información sobre los discos de materia que parecen rodear las jóvenes estrellas. Se cree que son la materia prima de sistemas planetarios semejantes al solar, y el *Telescopio Espacial Hubble* está logrando llamativos descubrimientos sobre ellos.

Uno de los obstáculos más importantes que sufre la observación de estrellas recién nacidas es el hecho de que la formación de éstas tenga lugar en el interior de densas nebulosas. El polvo que allí las rodea dispersa la luz visible y obscure los primeros estadios de su formación. La longitud de onda de la radiación infrarroja es mayor que la de la luz visible, y, por tanto, puede penetrar las espesas nubes y proporcionarnos información sobre lo que ocurre en su interior. Pero sólo en estos últimos años se han desarrollado detectores que generen imágenes de alta resolución del cielo infrarrojo.

Según Stephen Strom, estos aparatos "han revolucionado la astronomía protoestelar". Merrill y los Strom inspeccionaron con ellos Lynds 1641, una nube interestelar situada en el extrarradio de la Nebulosa de Orión (que se distingue a simple vista como una "estrella" difusa en la espada de Orión). Registraron claras imágenes, no vistas antes, de regiones de formación estelar en las que se encuentran algunas de las estrellas más jóvenes que se hayan observado jamás: tendrán sólo unos 500.000 años (a modo de comparación, el Sol tiene unos 4600 millones de años).

A medida que estos astrónomos miraban más profundamente en ese jardín de infancia estelar, fueron observando estrellas que se agrupaban en ocho pequeños agregados, de un año luz de anchura cada uno de ellos, y que contenían entre una docena y 150 estrellas.

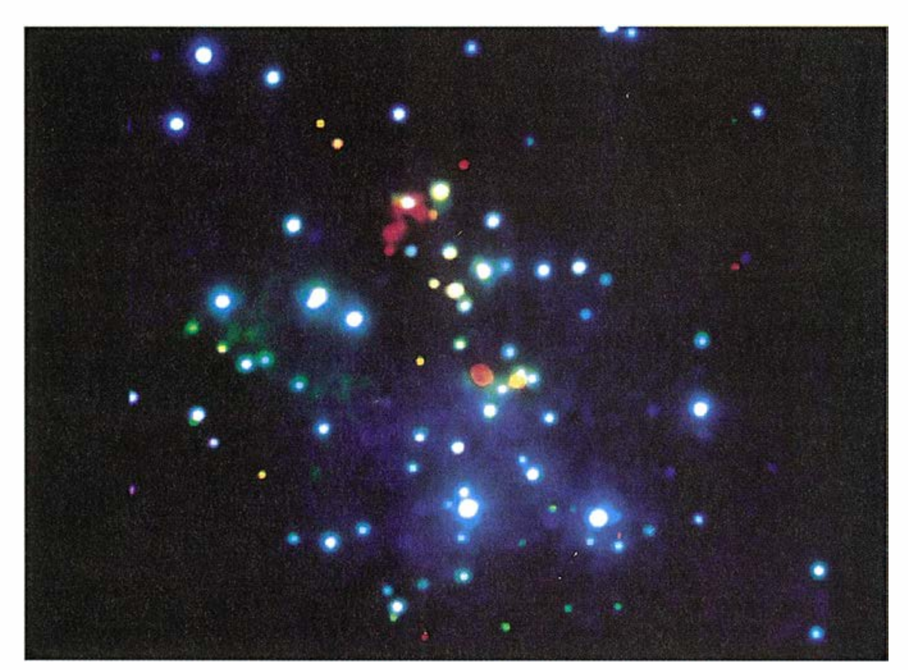
Hasta entonces, los astrónomos habían observado la formación de estrellas bien en objetos aislados, bien en vastas concentraciones que imposibilitaban la visión de detalles. Los nuevos hallazgos "muestran que quizá la manera más común de formarse las estrellas sea dentro de grupos pequeños", dice Stephen Strom. Las espectaculares asociaciones de jóvenes estrellas que se observan en otras partes de la Nebulosa de Orión estarán constituidas, seguramente, por muchos pequeños agregados estelares superpuestos, de distinta edad.

Aunque normalmente empiecen su vida en grupo, las estrellas acaban, por lo general, viajando en solitario por la Vía Láctea. Las imágenes infrarrojas tomadas de Lynds 1641 dan buenos vislumbres del proceso por el que las estrellas llegan a aislarse. Las más jóvenes y envueltas se hallan en el centro de las regiones de formación estelar. Las interacciones gravitatorias con sus vecinas terminan por expulsarlas del agregado, y las dejan en su solitario camino. Las imágenes obtenidas por Merrill y los Strom muestran una población de estrellas más viejas y menos veladas, que parecen haber emigrado hace poco de la agregación.

Las estrellas de Lynds 1641 dejan ver otros cambios a medida que envejecen. Casi todas las estrellas jóvenes emiten más radiación infrarroja de lo que cabría esperar en una estrellas aislada. Esta observación, junto con otros indicios, sugiere que hay discos de polvo alrededor de las estrellas que absorben la luz y la reemiten en forma radiación infrarroja. "Los discos son una parte natural del proceso de formación estelar", dice Stephen Strom. "La mayor parte de la materia que integra una estrella ha pasado por un disco".

Los discos desempeñan un papel importante en las primeras etapas de la evolución estelar. La conservación del momento angular implica que las estrellas deberían girar mucho más deprisa de como en realidad lo hacen. Los modelos teóricos indican que el disco ejerce una fuerza de arrastre que refrena la estrella y transfiere momento angular de la estrella hacia fuera, hacia el propio disco, lo que explica el hecho, bien conocido, de que el 99,5 por ciento del momento angular del sistema solar resida en los planetas y no en el Sol, aunque éste tenga una masa mucho mayor.

Joanne M. Attridge y William Herbst, de la Universidad Wesleyana, que han medido el período de rotación de 40 estrellas de la Nebulosa de Orión cuyas edades están comprendidas entre un millón y diez millones de años, han observado que las estrellas sin disco tienden a girar unas cuatro veces más deprisa que aquellas de sus hermanas que sí lo tienen. "Hasta las estrellas desnudas tienen que haber pasado por la fase del disco", dice Herbst, pero se han desprendido ya de él. Las más viejas de Lynds 1641, situadas en su parte exterior, muestran un exceso infrarrojo menor que sus compañeras del interior, en un claro ejemplo de que los discos menguan a medida que las estrellas envejecen. Cuando las estrellas llegan a unos 10 millones de años, las huellas que el disco imprime en el espectro desaparecen.



Estrellas recién nacidas se ven en esta imagen infrarroja en falso color. El rojo indica los objetos más obscuros.

El destino de la materia que forma los discos ha fascinado siempre a los astrónomos. Al menos en nuestro sistema solar, la materia del disco se reagrupó, y se constituyeron los planetas. Los Strom sostienen que hay "pruebas contundentes" de que están ocurriendo procesos similares alrededor de muchos soles en formación. Han sido observados finos discos de granos de polvo alrededor de un puñado de estrellas bastante maduras, entre ellas las brillantes Vega y Formalhaut. Esos granos "no tienen posibilidad de sobrevivir", señala Stephen Strom, pues rápidamente caen en espiral sobre su estrella central. De la persistencia de los discos de polvo se desprende la presencia de cuerpos progenitores, cometas o asteroides, que colisionan entre sí y generan el polvo. Muy a su pesar, los astrónomos todavía no pueden precisar si existen además objetos de tamaño planetario que estén en órbita alrededor de estas estrellas.

El *Telescopio Espacial Hubble* está proporcionando datos adicionales sobre los discos circumestelares. C. Robert O'Dell, de la Universidad Rice, con la colaboración de dos doctorandos, y J. Jeffrey Hester, de la Universidad estatal de Arizona, han estudiado estrellas de las regiones internas más brillantes de la Nebulosa de Orión. Han percibido allí siluetas de estrellas y de discos recortadas contra el fondo de radiación brillante que emiten las estrellas más calientes de la nebulosa. La radiación arranca jirones de materia de los discos y los empuja hasta formar una cola. Basándose en la tasa de evaporación de los discos, O'Dell calcula que éstos contienen unas 15 veces la masa de Júpiter, que es una cantidad de materia más que suficiente para formar un sistema planetario.

O'Dell dice de los discos que son "un eslabón perdido en nuestro conocimiento del proceso de formación de planetas semejantes a los de nuestro sistema solar". Casi cada nuevo descubrimiento afirma la idea de que los sistemas planetarios son una consecuencia habitual de la manera en que las estrellas nacen. Se diría que las estrellas están por naturaleza inclinadas a formar sus propia familias ya en su misma cuna.

Genoma humano

Cromosoma 21

En genética humana se estudian los cambios fenotípicos y moleculares que dan lugar a las enfermedades hereditarias. Conocemos más de 6000 defectos genéticos en el hombre, asociados a genes situados en regiones específicas de nuestro patrimonio hereditario. Estos 6000 defectos genéticos integran una porción pequeña del conjunto formado por más de los 100.000 genes responsables de la síntesis de las proteínas que constituyen nuestro organismo.

La compartimentación del material genético en los 23 pares de cromosomas permite agrupar genes o segmentos de ADN (marcadores) en cada uno de aquéllos y seguir la herencia de los mismos en el seno de los distintos miembros de una familia. Los genes o marcadores de un mismo cromosoma se heredan juntos, en tanto que se transmiten de forma independiente cuando se sitúan en cromosomas distintos. Por eso decimos que los marcadores instalados cerca unos de otros se hallan ligados, ligamiento que puede cortarse, mediante recombinación, durante el proceso de división celular denominado meiosis.

Llámase distancia genética la que media entre genes o marcadores; tiene por medida propia la unidad de recombinación o centimorgan (cM), equivalente aproximadamente a 1 millón de nucleótidos. Merced a ese patrón de análisis podemos levantar mapas genéticos de los cromosomas. Mapas que, a su vez, han resultado decisivos para descubrir los genes culpables de las principales enfermedades hereditarias (fibrosis quística, neurofibromatosis de tipo 1, distrofia muscular de Duchenne, distrofia miotónica, síndrome del X frágil y otras).

El Proyecto del Genoma Humano se ha impuesto como objetivo analizar todo el material genético del hombre: descifrar los más de 100.000 genes encerrados en más de 3000 millones de nucleótidos, en cada una de nuestras células. Si bien ésta es la meta final del proyecto, se pretende, a corto plazo, obtener un mapa genético con marcadores situados a una distancia de cerca de 1 cM y aislar cada cromosoma en pequeños fragmentos para un posterior estudio zonal del mismo.

Los avances técnicos que se han producido durante los últimos cinco años han moldeado las herramientas necesarias para conseguir el objetivo primero del Proyecto Genoma Humano: hacerse con el mapa completo. Citaremos dos, la polimerización en cadena (RCP), que multiplica breves secuencias de ADN, y los cromosomas artificiales en levadura (CAL), gracias a los cuales se aislan fragmentos bastante grandes de material genético (100 a 1000 kilobases). (Una kilobase equivale a mil bases.) Los productos de la RCP detectan puntos determinados de un cromosoma y de distintos CAL; esos puntos de identificación o hitos en la secuencia se les conoce sobre todo por las siglas STS (del inglés "sequence tag sites"). Los técnicos se apoyan en los CAL que tienen STS comunes para poner orden en la secuencia de

los distintos fragmentos de un cromosoma.

El cromosoma humano 21, el menor en tamaño, ofrece varios rasgos de interés y se le asocia a diversas enfermedades genéticas: síndrome de Down, ciertas formas del mal de Alzheimer, epilepsia mioclónica progresiva y esclerosis lateral amiotrófica.

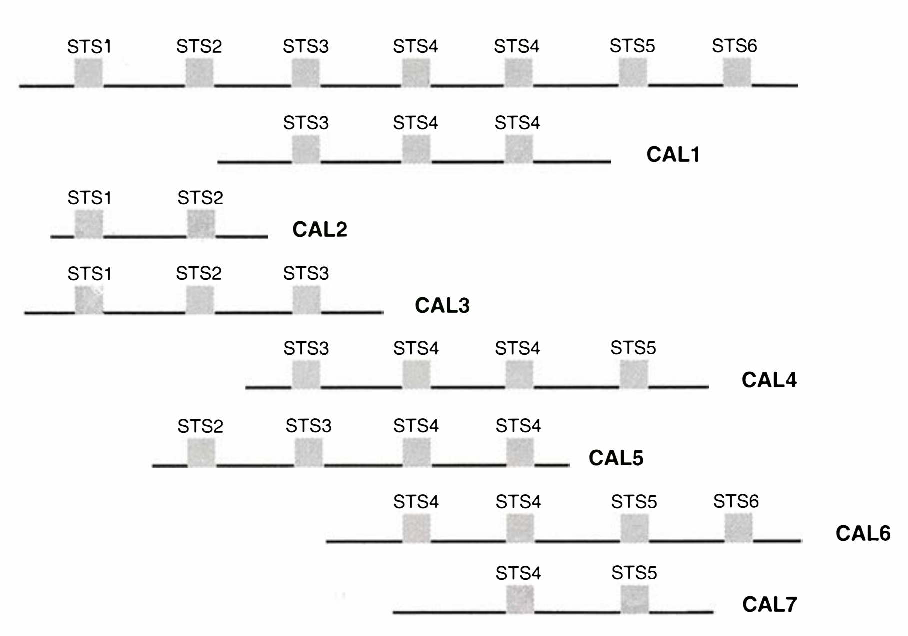
Se ha dado un paso decisivo hacia el análisis completo del genoma humano con la construcción reciente de un mapa continuo de CAL del cromosoma 21, empleando STS como puntos de referencia. El grupo que dirige Daniel Cohen en Francia ha empleado STS, desarrollados por investigadores de distintos centros (entre los que se encuentra el departamento de genética molecular del Instituto de Investigación Oncológica de Barcelona), para identificar 810 CAL de entre un total de 70.000 que abarcan el genoma humano entero. Los distintos CAL fueron analizados en grupos de 92, mediante la técnica de la polimerización en cadena, para un total de 198 STS. Este trabajo ha permitido obtener una secuencia continua de fragmentos de ADN que, en solapamiento, cubre la totalidad del brazo largo del cromosoma 21 (21q). De este modo, los fragmentos de ADN en CAL se hallan aislados y ubicados, y comprenden de 40 a 50 millones de bases (megabases, Mb) de dicho cromosoma, correspondientes a la longitud estimada previamente para dicho cromosoma.

El trabajo realizado en el cromosoma 21 abre el camino para el clonaje posicional, es decir, detectar un gen en función de su alojamiento en el genoma, y aislar los genes implicados en cualquier enfermedad asociada al cromosoma 21. Permitirá, además, analizar automáticamente la secuencia de cada CAL o estudiar la estructura de las distintas partes de un cromosoma mediante el examen de los distintos CAL.

El estudio del cromosoma 21 ha venido acompañado por el realizado en el cromosoma Y, del que se ha ocupado el grupo de David Page; ha seguido pareja pauta en la construcción de un mapa continuo de CAL de dicho cromosoma, de cuyo resultado se habrá de beneficiar la investigación de genes y secuencias implicadas en la determinación de las características sexuales.

Transcurridos tres años de la puesta en marcha del Proyecto, los mapas de los cromosomas 21 e Y constiuyen sus frutos más brillantes y prometedores. Pero no los únicos. Apenas un mes más tarde de la publicación en *Nature* y *Science* de los trabajos mencionados, las mismas revistas exponían los resultados de Weissenbach y del grupo cooperativo CEPH/NIH, los cuales suponen otro avance cualitativo y cuantitativo en la construcción del mapa genético completo del genoma humano. Si en el caso de los cromosomas 21 e Y se trataba de un mapa continuo de segmentos de ADN, en éste se han desarrollado unos 800 nuevos marcadores polimórficos (segmentos de ADN que muestran variabilidad), ya analizados lo mismo que los existentes en familias de referencia. El mapa contiene unos 1500 marcadores y cubre el 90 % del genoma con una resolución de 5 cM.

Semejante progreso en tan breve lapso de tiempo infunde confianza de que el Proyecto Genoma Humano se encuentra en el buen camino y que los grandes esfuerzos empeñados en Francia y en Estados Unidos están dando sus frutos. Otros países laboran con parecido tesón (Japón, Alemania, Italia, Gran Bretaña) en programas propios que favorecen la investigación en este ámbito. La información que aportará el Proyecto permitirá, en las próximas décadas, establecer las bases para una investigación biomédica de nuevo signo, con particular incidencia en el dominio de la prevención y del diagnóstico de las enfermedades comunes que afectan al hombre. (Xavier Estivill y Assumpció Bosch, dpto. de genética molecular del Instituto de Investigación Oncológica–Hospital Duran y Reynals, Barcelona.)



Representación esquemática de la superposición de CAL (cromosomas artificiales de levadura) mediante el empleo de STS. Los distintos CAL se ordenan en función de los STS que contienen, pudiendo ubicar cualquier nuevo CAL o STS en el mapa continuo de superposición.

Planetas habitables

Vida en el cosmos

La Tierra gira confortablemente entre Venus, en ascua como el infierno, y Marte, congelado y de liviana densidad atmosférica; los impactos de grandes cometas y asteroides son tan raros, que las extinciones en masa parecen acontecimientos extraordinarios; las condiciones no han dejado de ser hospitalarias para la vida durante miles de millones de años.

Los modelos de ordenador empiezan a esclarecer las intrincadas circunstancias que han llevado a este feliz desenlace. A George W. Wetheriel se le deben minuciosas simulaciones de las etapas finales de la formación planetaria, cuando los "embriones de planetas" (objetos de un tamaño aproximado al de la Luna) van fundiéndose unos con otros y se constituye la ordenación final del sistema planetario. Wetherill ha obtenido que la gestación de planetas semejantes a la Tierra parece constituir más la regla que la excepción, pero su trabajo, como él mismo reconoce, está "en el filo de la seguridad científica."

Según la teoría vigente, los sistemas planetarios se forman, mediante un proceso de constitución de abajo arriba, a partir de discos aplanados de gas y polvo que rodean a las estrellas nacientes. Diminutas partículas se van condensando en otras cada vez mayores, que, ayudadas por su mutua gravitación, se transforman



El gigante Júpiter quizás haya mantenido a salvo la vida sobre la Tierra al limpiar el sistema solar de la mayor parte de sus cometas.

con rapidez en planetas completamente desarrollados. Después de efectuar unos cuantos cientos de simulaciones informáticas en un terminal WAX, Wetherill halló que casi siempre se formaba un planeta de masa parecida a la terrestre, a una distancia del centro del sistema entre 0,8 y 1,3 veces la que separa la Tierra del Sol (esta distancia, igual a 149.600.000 kilómetros, suele denominarse unidad astronómica o, simplemente, UA).

No todos esos planetas serían habitables, por supuesto. Wetherill descubrió que las condiciones reinantes en mundos similares a la Tierra pueden depender hasta un extremo que sorprende de la existencia de planetas de gran tamaño, semejantes a Júpiter, en la periferia del sistema solar. Los astrónomos creen que poco después de la formación de la Tierra, los planetas gigantes (sobre todo Júpiter) arrojaron billones de cometas desde el interior del sistema solar al espacio interestelar. Los cometas pueden crearle serios problemas a la vida; se numera el impacto de uno de gran tamaño entre las causas probables de las extinciones generalizadas, así la que supuso la desaparición de los dinosaurios.

La formación de Júpiter es, a su vez, un delicado problema. Un planeta puede crecer hasta tener semejante tamaño sólo si ha adquirido masa suficiente para nutrirse directamente del gas de la nebulosa que rodea a la estrella joven, pero es probable que la nebulosa se disipe antes de que el protoplaneta alcance ese punto crítico.

Sin Júpiter, según su modelo, habría habido muchos más cometas en órbitas que les llevarían a chocar con la Tierra. Los impactos tendrían lugar con una frecuencia aproximadamente mil veces superior a la frecuencia con la que se producen en realidad, y las grandes extinciones sucederían cada 100.000 años más o menos, lo que habría llevado a la evolución a tomar otro rumbo.

Las ecuaciones de Wetherill no prueban, sin embargo, que los planetas de la clase de Júpiter sean raros. "Yo no me rendiría tan fácilmente", afirma; al fin y al cabo, en el único sistema planetario que los científicos pueden estudiar, un Júpiter se las arregló para formarse. "La única manera de resolver el rompecabezas es mirar cómo son otros sistemas solares", sostiene, "y espero que seamos capaces de hacerlo pronto".

Aun obviando la existencia de peligrosos cometas, los cálculos de Wetherill no nos dicen si los planetas cuasiterrestres de sus simulaciones tendrían en superficie condiciones apropiadas para la vida. James F. Kasting y Ray T. Reynolds investigan esta cuestión por medio de modelos de ordenador que simulan el clima en distintas condiciones.

Pretenden definir la "zona habitable" en torno a una estrella, es decir, la región en la que un planeta gozaría de las temperaturas adecuadas para conservar el agua líquida y, en principio, sustentar la vida como nosotros la conocemos.

En un artículo reciente, el grupo de Kasting ha calculado la anchura de la zona habitable del Sol y otras estrellas similares. La velocidad creciente a la que el agua escapa a la estratosfera, donde la radiación la descompone en hidrógeno y oxígeno, determina básicamente el radio del borde interno de esa zona. En los 4600 millones de años de existencia del sistema solar, los planetas situados a menos de 0,95 UA del Sol habrían perdido toda su provisión de agua. Mundos de tal aridez no mantendrían, durante períodos prolongados, las formas de vida que dependiesen del agua.

En el borde externo, el problema es la conservación del calor. Un leve efecto de invernadero mantiene la Tierra a una temperatura suave. A mayor distancia del Sol, el efecto ha de ser más intenso para lograr el mismo resultado. Los cálculos de Kasting demuestran que en un planeta situado a más de 1,37 UA del Sol, el dióxido de carbono empieza a congelarse en las capas altas de la atmósfera, refleja más radiación de vuelta al espacio y rebaja aún más la temperatura. Semejante retroalimentación congelaría el planeta.

Kasting y su equipo advierten que sus cálculos podrían infravalorar la extensión de la zona habitable. Pone el ejemplo de Marte, situado a 1,52 UA del Sol. Los canales quizá se produjesen, hace casi cuatro mil millones de años, por la presencia, gracias a una mayor temperatura en la superficie del planeta, de grandes cantidades de agua líquida. Esto es extraordinario, pues, según las teorías de la evolución estelar, el Sol brillaba entonces alrededor de un 25 por ciento menos que ahora. "El clima marciano primitivo es un problema sin resolver", dice Kasting.

De cerca

Fotos y texto: Satoshi Kuribayashi

Salto de la rana

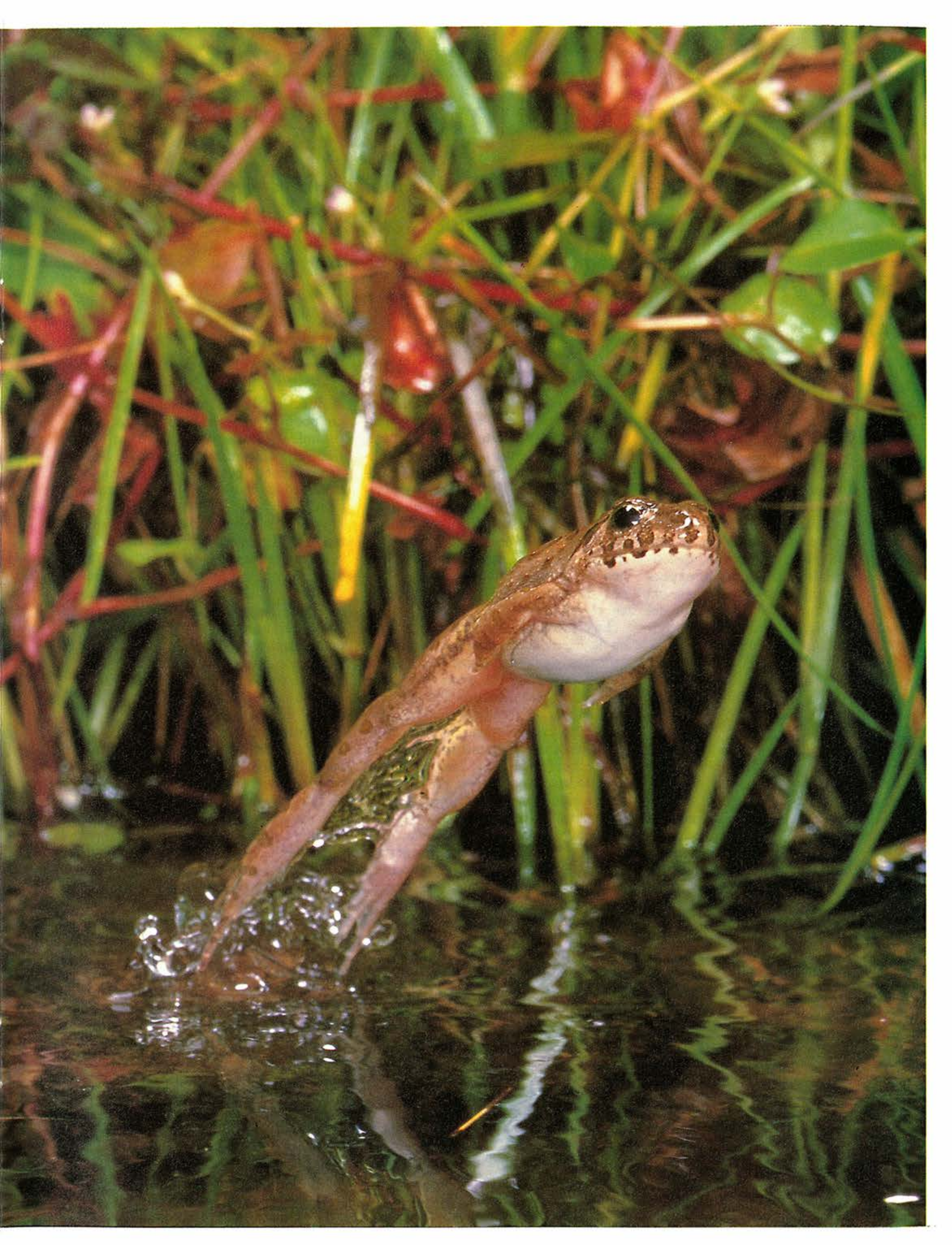


La familiaridad no suele acompañar la admiración, principio, para Aristóteles, de todo conocimiento. Pocas veces, en efecto, nos hemos preguntado, detenidos ante cualquier estanque, de dónde saca la rana fuerza suficiente para saltar como una exhalación a la caza de una presa que no vemos o huyendo de un peligro que no advertimos. Lo consideramos algo connatural y común.

Los anfibios, los de "doble vida", fueron los primeros vertebrados que colonizaron, desde el agua, el medio terrestre. Hubieron, pues, de adaptar la estructura esquelética para poder saltar y soportar el peso de su propio cuerpo en un entorno menos denso. En una transición gradual, favorecida por la ausencia de enemigo exterior, promovieron la aparición de un tegumento glandular que impidiera la desecación y un aparato respiratorio pulmonar.

Tengo en la charca del jardín un pequeño zoo acuático. Más de una vez he quedado embelesado con los ojos saltones de los anuros, con su piel polícroma y mimética del entorno. Rompen su reposo bruscamente si se sienten amenazados por la presencia repentina de algún reptil. Así ocurrió con la rana de la fotografía. Descansa habitualmente en la orilla del agua, dispuesta a sumergirse a la menor inquietud. Salvo en esta ocasión: hallábase en una piedrecita del fondo, cuando un deslizamiento cuya gravedad sólo ella conocía la indujo a saltar en toda su hermosura y gracilidad.

Foto de la derecha
distancia focal: 105 mm
diafragma: F = 32
exposición: 1/25.000 de segundo
película: ISO = 100



¿Cómo deberían pensar los químicos?

Los químicos pueden crear moléculas naturales con medios que no lo son. O pueden crear magníficas estructuras nunca vistas anteriormente. ¿Cuál debería ser su norte?

Roald Hoffmann

En el Vaticano se encuentra el fresco de Rafael titulado *La escuela de Atenas*. Platón y Aristóteles caminan hacia el observador; la mano de aquél apunta hacia el cielo, éste tiende su mano hacia adelante, paralelamente al suelo. Es un mensaje que casa con sus filosofías: Platón tenía una prototeoría geométrica de la química de la materia; Aristóteles, en cambio, describía con detalles fidedignos la extracción de la púrpura de Tiro (de la que hoy sabemos fue precursora del añil) de rocas con conchas de múrices. Platón buscaba lo ideal, Aristóteles volvía la vista a la naturaleza.

La química moderna se enfrenta al mismo dilema que el fresco de Rafael simboliza. ¿Se debería seguir el camino que la mano de Aristóteles indica o el que nos señala Platón con la suya? ¿Es la naturaleza una fuente de nuevos materiales tan caudalosa como algunos aseguran? ¿Podremos crear, por ejemplo, mejores compuestos imitando la microestructura de una pluma de ave o de un hilo de tela de araña? ¿Deberían los químicos inspirarse en formas matemáticas ideales? ¿O tendríamos, quizá, que aventurarnos al azar?

Para algunos, la división entre lo natural y lo no natural es arbitraria; argumentarían que el hombre y la mujer son evidentemente naturales, y con ellos, todas sus obras. Esta opinión es comprensible, pero elimina una distinción que muchos no querrían obviar. Por esto no la adoptaré, y distinguiré entre las acciones humanas, con una finalidad por lo común, y las de los animales, las plantas y el mundo inanimado que nos rodea. Una puesta de sol es natural; no lo es una fábrica de ácido sulfúrico. Pero, ¿son naturales o fruto de una acción dirigida los 1300 millones de cabezas de ganado que hay en el mundo?

Las moléculas naturales que hay en la Tierra surgieron hace miles de millones de años, a medida que se fueron enfriando las rocas, formando los mares, escapándose los gases y evolucionando la vida; alcanzan hoy una cifra astronómica. Se han aislado, purificado e identificado algunos centenares de miles. Las moléculas que podríamos inscribir en el grupo de no naturales se crearon a lo largo de los tres últimos siglos.

A cada cosa en este mundo, viva o no, le corresponde una estructura. En el fondo, todas son moléculas, agrupaciones persistentes de átomos asociados a otros átomos.

¿Cómo se han formado las moléculas en la naturaleza, sea la penicilina en el moho, sea una sustancia precursora del añil en una roca con múrices? ¿Cómo se fabrican en los laboratorios, cristalinos, refulgentes, todos esos kilómetros cuadrados de envoltorios de alimentos, toda esa ingente cantidad de tabletas de aspirina? Un mismo proceso ha hecho aquello y esto: la síntesis.

La química es la ciencia de las moléculas y sus transformaciones. El resultado de una transformación, lo mismo si es natural que si la dirigen seres humanos, $A \rightarrow B$, es una nueva sustancia. La síntesis química, la producción de algo nuevo, es sin lugar a dudas un acto creativo. Es una afirmación de la humanidad, como un poema de Juan Ramón o el advenimiento de la democracia en Rusia. Pero crear tiene riesgos. (Un sedante nuevo puede ser efectivo, y también la causa de una malformación fetal.)

Friedrich Wöhler mezcló dos sustancias, las calentó y obtuvo un resultado inesperado: la síntesis de la urea. Pero han ocurrido muchas cosas desde 1828. Para explicar cómo se hacen las moléculas hoy en día y cómo en esta actividad creativa se entremezclan lo natural y lo no natural, recurriré a la síntesis de dos sustancias: la primaxina y la rueda férrica.

La primaxina es uno de los antibióticos más efectivos del mercado, y muy lucrativo para los laboratorios Merck & Co. El fármaco no es una sola molécula, sino una mezcla de dos compuestos, "imipenem" y cilastatina. Estos son sus nombres "triviales". Los nombres "sistemáticos" son un poco más largos; por ejemplo, el "imipenem" es

ácido [5R-[5α, 6α(R*)]]-6-(1-hidroxietil)-3-[[2-[(iminometil)amino]-etil]tio]-7-oxo-1-azabiciclo[3.2.0]hept-2-en-2-carboxílico.

La primaxina se creó con un poco de forja no natural, que imitaba el quehacer de calderero atribuido al proceso de evolución biológica. El "imipenem" de por sí es un buen antibiótico. Pero una enzima renal lo degrada rápidamente, lo que frenaba su aplicación en infecciones del aparato urinario. Los químicos de los laboratorios Merck encontraron en su colección de muestras un compuesto, sintetizado en los años cuarenta, que prometía dar buenos resultados y era

ROALD HOFFMANN compartió el premio Nobel de química con Kenichi Fukui en 1981. Nació en Zloczow, Polonia, en 1937. Después de la guerra, el año 1949, se trasladó a los Estados Unidos. Estudió química en la Universidad de Columbia y obtuvo su grado de doctor en la Universidad de Harvard. En 1965 se incorporó a la Universidad de Cornell, donde actualmente ocupa la cátedra John A. Newman de física.

capaz de contrarrestar la enzima. Modificado para obtener una acción más amplia, se convirtió en la cilastatina. Evidentemente, había que probar la combinación del antibiótico y la enzima inhibidora. La mezcla funcionó. El "imipenem" se obtiene a partir de un producto natural; la cilastatina, no. Ambos se producen sintéticamente en el proceso de fabricación comercial, del que hablaré, tras exponer con cierto detenimiento la historia de uno de los componentes.

Un equipo de químicos de los laboratorios Merck, dirigido por G. Christensen, desarrolló el "imipenem" en los años setenta. Es una forma ligeramente modificada de otro antibiótico, la tienamicina, descubierta al tamizar muestras de tierra de Nueva Jersey, y es producido por un moho, el *Streptomyces cattleya*, cuyo nombre se debe a que su color pálidamente purpúreo recuerda al de la orquídea cattleya. El moho constituye una auténtica fábrica de estupefacientes, pues produce tienamicina y otras muchas variedades de antibióticos.

Pero la tienamicina no era químicamente estable en altas concentraciones. Y, en palabras de un miembro del equipo de Merck, "ese precioso organismo que tenía color de orquídea era demasiado tacaño". Los procesos usuales de fermentación, que la industria farmacéutica había perfeccionado durante los últimos 50 años, no proporcionaban cantidad suficiente de la molécula, por cuya razón los químicos decidieron producir cantidades mayores de tienamicina en el laboratorio.

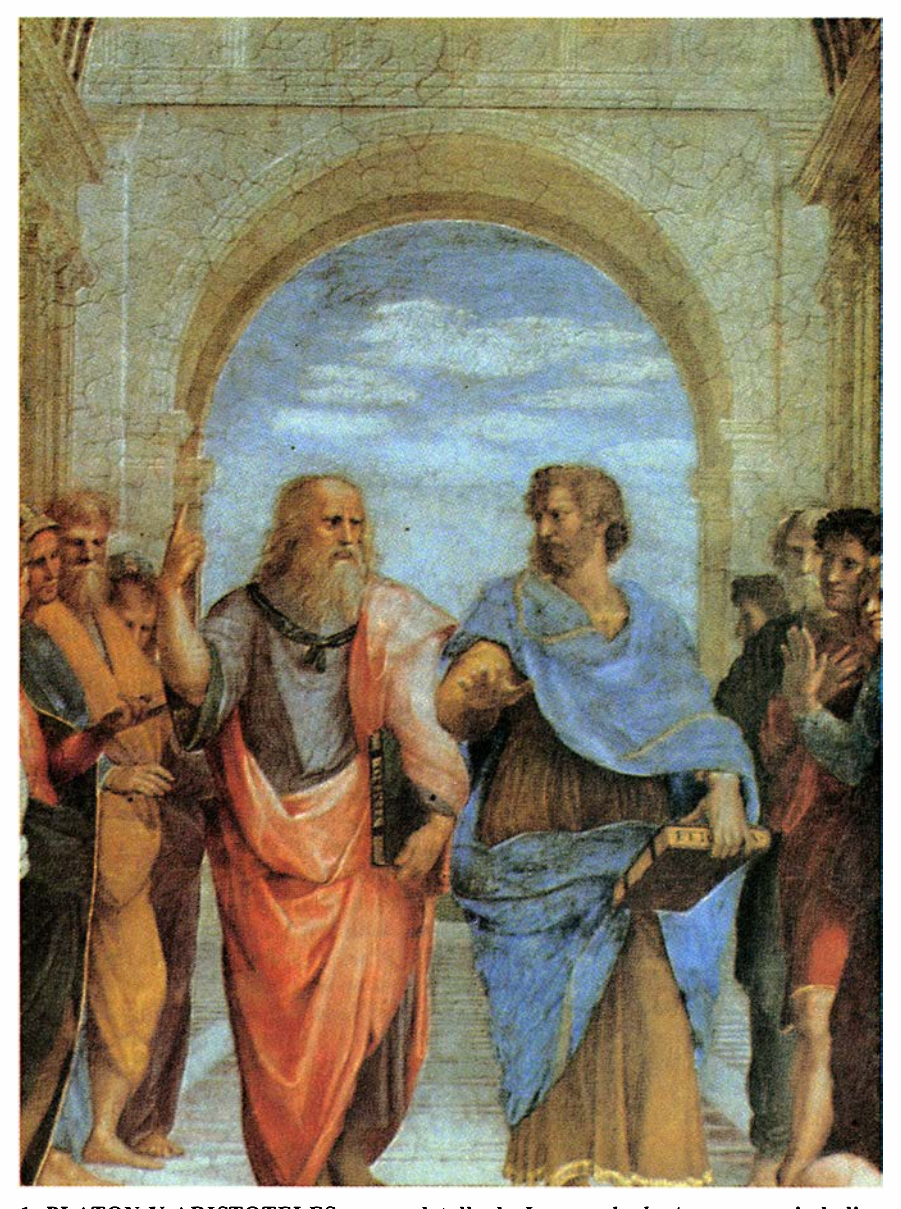
La producción de la tienamicina requirió 21 pasos importantes, cada uno de los cuales constaba de varias operaciones físicas: disolución, calentamiento, filtración y cristalización. Entre la materia de partida —un aminoácido común, el ácido L-aspártico— y el producto buscado —tienamicina— se aislaron y purificaron otras 20 moléculas.

La primera impresión que este proceso nos da es la de algo demasiado intrincado. Pero así ha de ser, ya que nos hallamos ante la imagen en el laboratorio de la complejidad biológica de las bacterias, de nuestra propia complejidad. El mundo real es complicado y bello, y lo mejor es que aceptemos su riqueza.

Para hacernos una idea del sudor, si no de las lágrimas y la sangre, que costó este proceso, prestemos nuestra atención a la parte experimental del escrito en que se dio cuenta de la síntesis lograda; veamos, más en concreto, un fragmento donde se describe un paso crítico y muy original del proceso de síntesis, la transformación del octavo compuesto en el noveno:

> Una suspensión de "diazo ceto éster" 8 (3,98 g 10,58 mmol) y acetato de rodio (II) diluido (0,04 g 0,09 mmol) en tolueno anhidro (250 ml) se depuró con nitrógeno, y luego se calentó en un baño de aceite, que se removía y mantenía a una temperatura de 80 °C, durante dos horas, tras lo cual se sacó del baño la mezcla de reacción, y se la filtró cuando aún conservaba el calor a través de una capa de sulfato de magnesio anhidro. El filtrado se evaporó al vacío, y se obtuvo el bicíclico ceto éster 9 (3,27 g, 89 %) en forma de sólido coloreado...

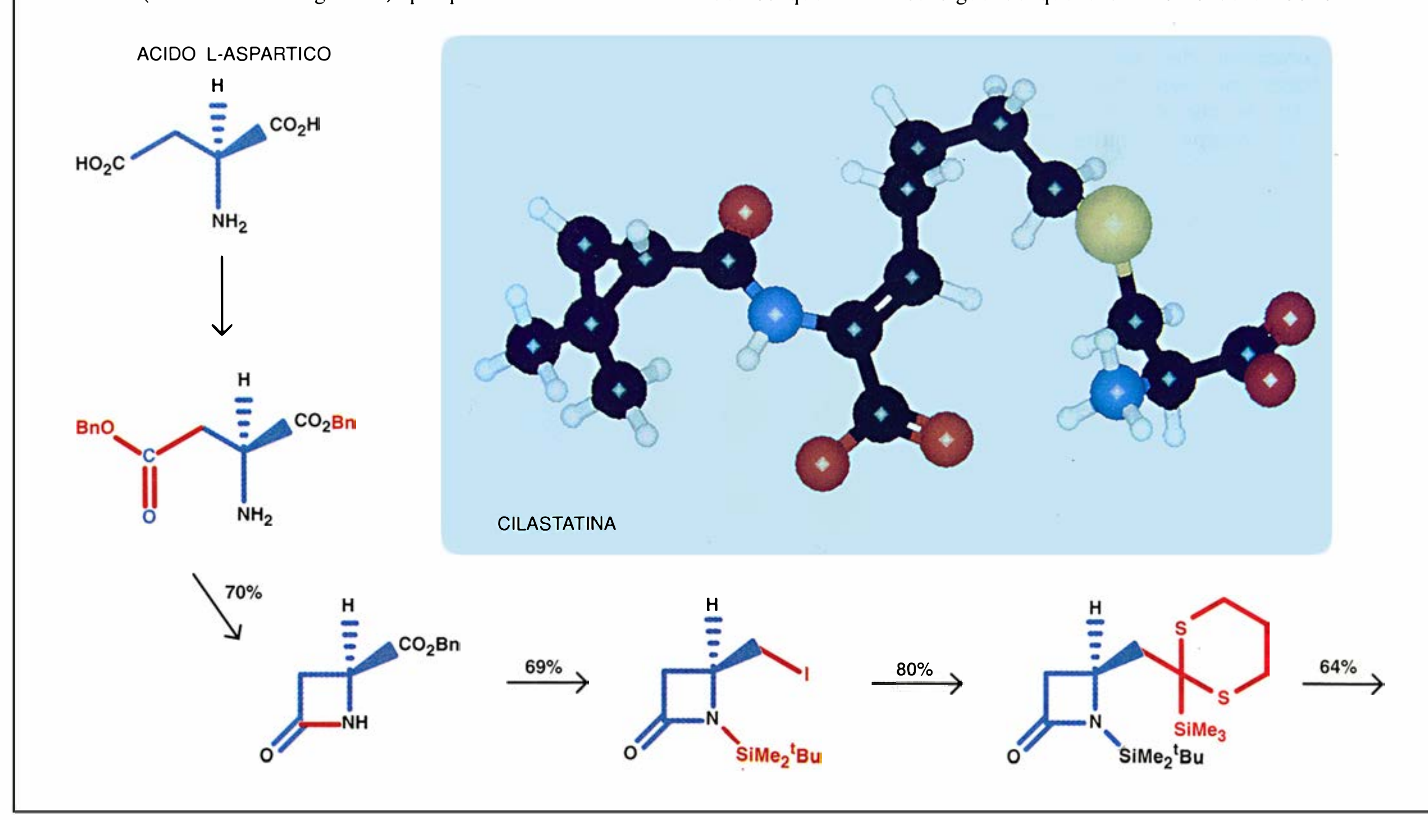
Esta descripción del proceso experimental, con toda su jerga, es un relato demasiado lineal, expurgado además. Las cosas eran como cuenta, así de claras, de optimizadas, sólo al final. Pero no al principio. Si dejamos esto a un lado, sentiremos que el informe trasluce trabajo, que nos hace sentir el tiempo y el esfuerzo invertidos en la sucesión de operaciones involucradas. A veces, de la misma manera que románticamente creemos que la inspiración hace manar las palabras en las mentes de los poetas, olvidamos lo que



1. PLATON Y ARISTOTELES, en un detalle de *La escuela de Atenas* que simboliza su manera de acercarse al conocimiento. Aristóteles con la mano señala la tierra; Platón, el cielo con el dedo. Aristóteles busca respuestas en la naturaleza; Platón, lo ideal. ¿Deberían los químicos seguir el gesto que con la mano hace Aristóteles, o el que con la suya indica Platón?

La fabricación de un antibiótico

El antibiótico llamado Primaxina es una mezcla de dos compuestos, el "imipenem" (*modelo de bolas y barras de la derecha*) y la cilastatina (*modelo de la izquierda*). El "imipenem" es una forma ligeramente modificada de la tienamicina; cierto moho la sintetiza. Los químicos desarrollaron un método (resumido en el gráfico) que produce la tienamicina de forma más eficaz que cualquier proceso natural conocido. Las figuras de barras se muestran aquí a la manera típica de los químicos: no se identifican todos los átomos; los vértices sin etiquetas atómicas representan átomos de carbono; se suprimen casi todos los átomos de hidrógeno, y la posición de los que faltan se sigue de que cada átomo de carbono



no es sino mero y puro esfuerzo en el acto de crear. Al fin y al cabo, hasta el Creador descansó al séptimo día.

Podría interesar saber cómo cambian estos procedimientos cuando el mismo proceso se hace a gran escala. No se puede fabricar tienamicina por valor de cientos de millones de dólares como si se tratara de lograr unos gramos en el laboratorio. La descripción de la síntesis industrial de la tienamicina es la siguiente:

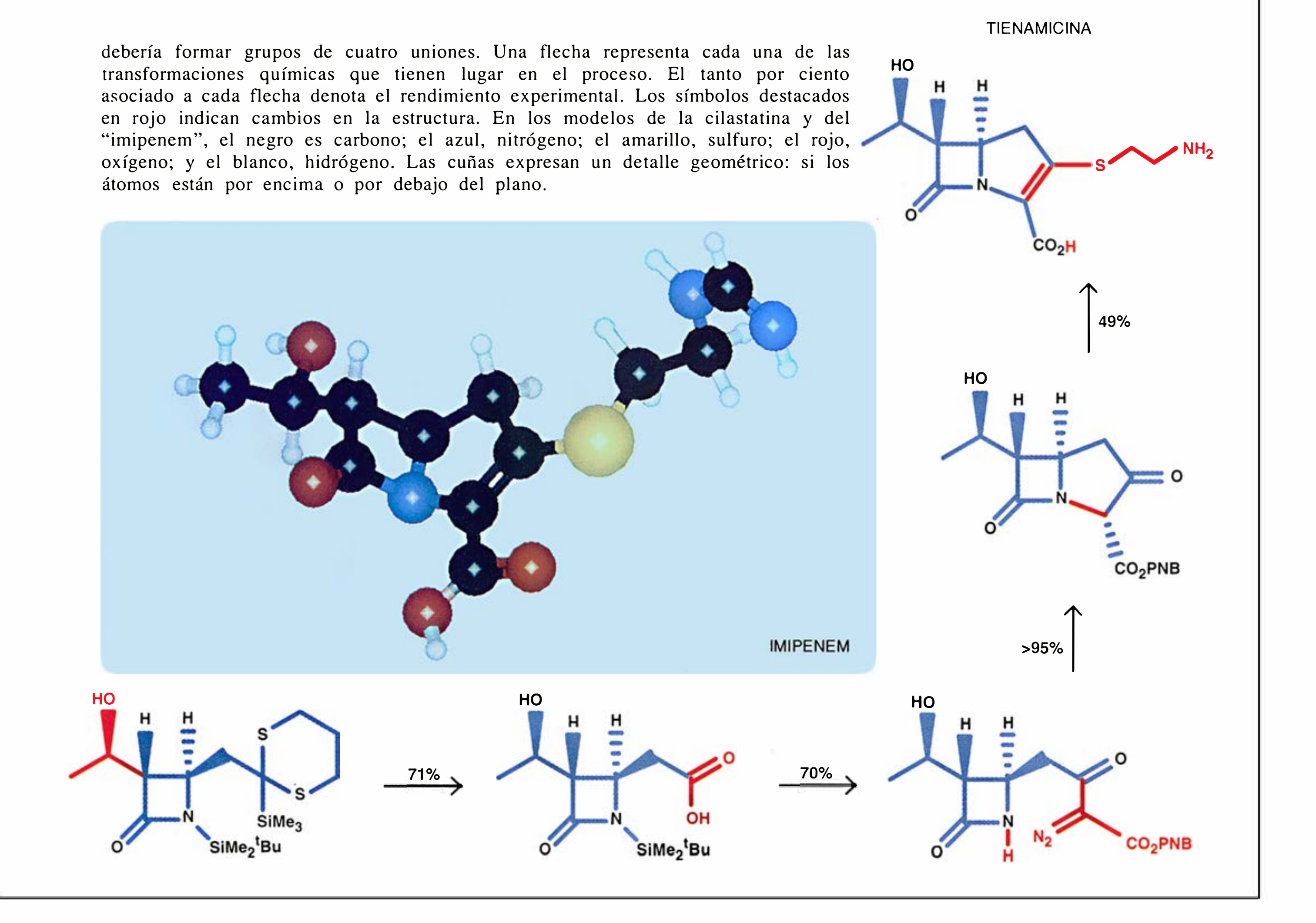
> Los sólidos que contienen 200 kg de 8 se introducen en 1902 litros de $MeCl_2$ en el tanque TA-1432. Mientras, se limpia el interior del reactor ST-1510 llevando a ebullición 747 litros de $MeCl_2$. La mezcla se traslada al ST-1510, seguida de 189 litros de $MeCl_2$ líquido. Se le añaden al ST-1510 1514 litros de $MeCl_2$ seco, y se hace circular agua caliente (65 °C) en los intercambiadores de calor para concentrar la hornada a 2063 litros donde el KF (Karl Fisher) de la mezcla es aproximadamente 0,5 g/l H_2O. El destilado se condensa y recoge en otro tanque.

Cocinar estofado de ternera para mil personas no es lo mismo que cocinar en casa para cuatro.

La síntesis de la tienamicina es un proceso de construcción, que va de las piezas más simples hasta el complejo final. Tiene muchas características compartidas con la arquitectura. Por ejemplo, una estructura intermedia necesaria puede ser más complicada que el principio o el final; pensemos en el andamiaje. La síntesis química es un fracaso local de la entropía, como lo son nuestras construcciones y ciudades. Pero la analogía con la arquitectura es tan viva, que uno se olvida de lo diferente y maravilloso que es este tipo de construcción molecular. En un matraz puede haber 10^{23} moléculas, que se mueven con mucha rapidez y chocan a menudo entre sí. Sin que hagamos nada, dejándolas que sigan sólo el dictado de la termodinámica, las moléculas empiezan a mezclar sus electrones, a romperse y a formar cadenas, y satisfacen lo que les pedíamos; con un poco de suerte, hasta un 99 % lo harán.

Los químicos pueden calcular fácilmente, dados unos gramos de material de partida, cuánto producto se debería obtener al final del proceso. Este es el rendimiento teórico. La cantidad real obtenida es el rendimiento experimental. No hay ni una forma de conseguir algo de la nada, pero sí muchas de obtener menos de lo que en teoría podríamos sacar. Una de ellas consiste en derramar la mitad de la solución por el suelo; el rendimiento sería sólo del 50 por ciento. Esto no impresionaría a nadie. Pero, aun realizando cada transferencia con tanto esmero como fuese posible, la naturaleza podría jugarnos una mala pasada y transformar el 70 % en una bazofia. Esto tampoco impresiona: no es precisamente un ejemplo de control mental sobre la materia. Los rendimientos experimentales sirven de criterio, no sólo de la eficacia que demanda la industria, sino también de elegancia y control.

Hay más, mucho más, que decir sobre las síntesis orgánicas planificadas. Pero vamos a mi segundo objeto de estudio: la rueda férrica.



debería formar grupos de cuatro uniones. Una flecha representa cada una de las transformaciones químicas que tienen lugar en el proceso. El tanto por ciento asociado a cada flecha denota el rendimiento experimental. Los símbolos destacados en rojo indican cambios en la estructura. En los modelos de la cilastatina y del "imipenem", el negro es carbono; el azul, nitrógeno; el amarillo, sulfuro; el rojo, oxígeno; y el blanco, hidrógeno. Las cuñas expresan un detalle geométrico: si los átomos están por encima o por debajo del plano.

Stephen J. Lippard y Kingsley L. Taft, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, sintetizaron la rueda férrica, conocida también como $[Fe\text{-}(OCH_3)_2(O_2CCH_2Cl)]_{10}$. Descubrieron esta rareza mientras estudiaban las moléculas de algunas reacciones inorgánicas que ocurren en los sistemas biológicos. Por ejemplo, un grupo de átomos de hierro y oxígeno se encuentra en el núcleo de muchas proteínas importantes, como la hemeritrina, la reductasa de ribonucleótidos, la metano-oxigenasa y la ferritina.

Lippard y Taft, en su acoso a estas moléculas, consiguieron una reacción decepcionantemente sencilla. Cuán simple es, se ve en la sección experimental de su comunicado, que reproduzco en su integridad:

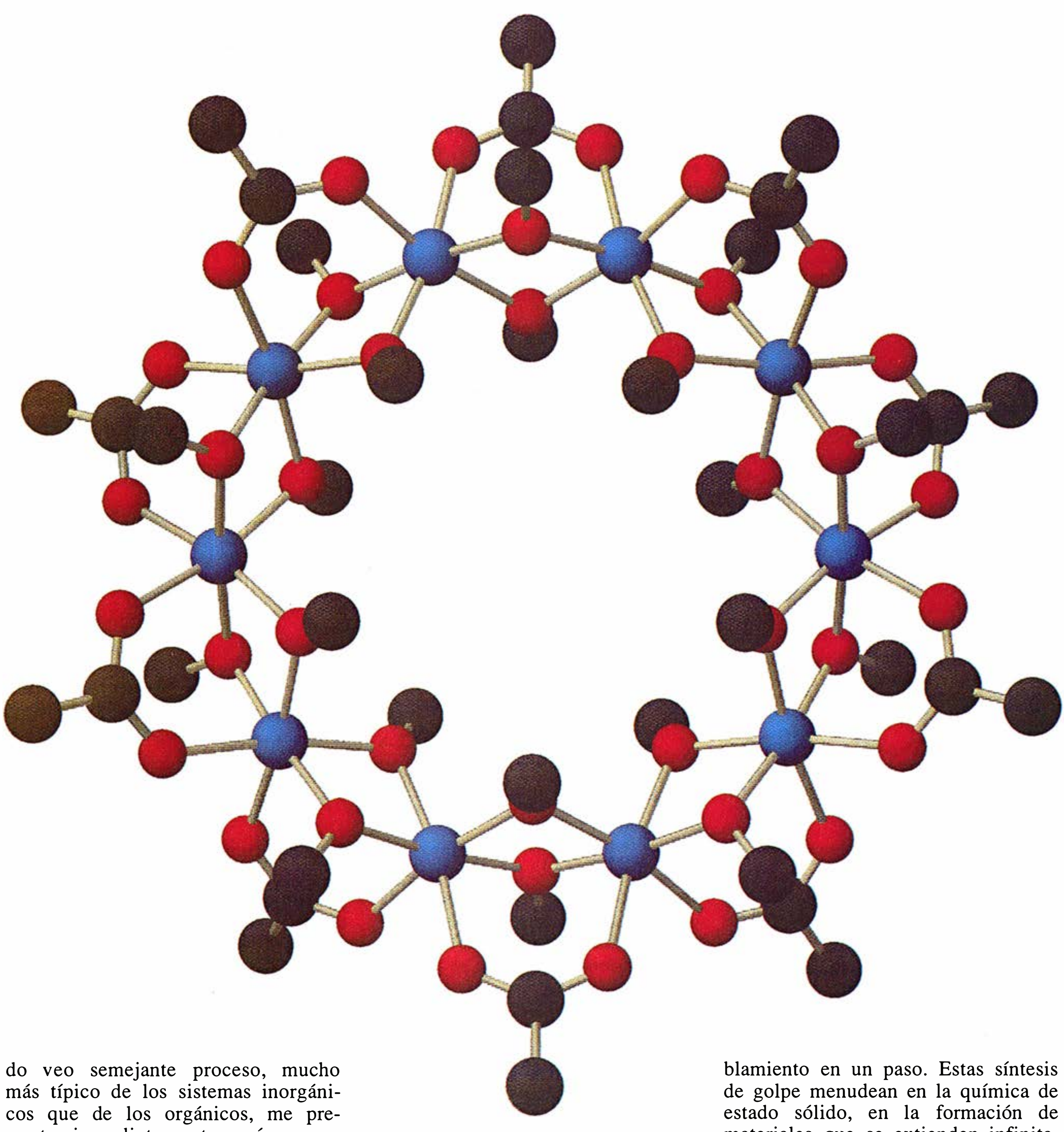
> El compuesto 1 se preparó dejando reaccionar el monocloroacetato análogo del acetato básico de hierro $[Fe_3O\text{-}(O_2CCH_2Cl)_6(H_2O)_3](NO_3)$ (0,315 g, 0,366 mmol) con 3 equivalentes de $Fe(NO_3)_3{\cdot}9H_2O$ (0,444 g, 1,10 mmol) en 65 ml de metanol. La difusión de éter en la solución de color verde-marrón dio una solución amarilla, que al cabo de unos días depositó cristales de 1, de color dorado-marrón, y un precipitado de color amarillo.

Sometiendo los cristales de color dorado-marrón a difracción de rayos X, Lippard y Taft determinaron el orden de los átomos en la molécula. La estructura consta de 10 iones férricos (hierro en estado de oxidación tres) en una disposición prácticamente circular. Cada átomo de hierro está unido a sus colaterales por medio de puentes de metóxido y carboxilato, "formando una rueda de hierro molecular", como dicen sus descubridores.

Nadie negará la belleza visual de esta molécula. Sus ventas anuales no son como las de la primaxina, que se estiman en unos 500 millones de dólares. Muy al contrario, parece que su obtención costará a los contribuyentes estadounidenses varios miles de dólares. Pero no conozco ni un solo químico que no reaccionase positivamente ante esta preciosa creación. Quizás algún día se le encuentre alguna utilidad a la rueda férrica; quizá sea un eslabón más en la explicación de la función de las proteínas que contienen hierro. La verdad es que me tiene sin cuidado, porque esta molécula me proporciona un estado anímico tan elevado como el que siento al escuchar un trío de piano de Haydn.

¿Por qué es bella esta molécula? Porque su simetría llega directamente al alma. Toca una nota del ideal platónico. Las líneas melódicas del trío cantan, aunque la pieza logra su efecto gracias al contrapunto; recurre a las armas de la complejidad, la rueda férrica, en cambio, es pura melodía.

Si tuviésemos que exponer la síntesis de la rueda férrica, no habría en nuestra explicación más que una flecha, que iría del cloroacetato de hierro y el nitrato férrico hasta el producto. Se trata de una síntesis de un tipo muy distinto de la que hemos visto antes: el producto se autoensambla hasta su gloria final. Cuan-



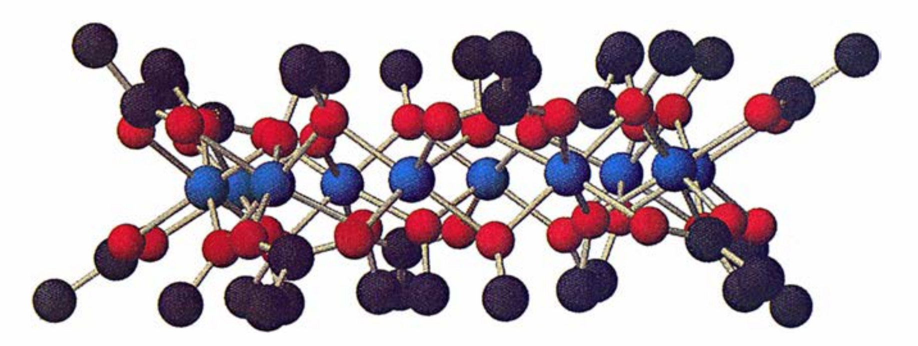
do veo semejante proceso, mucho más típico de los sistemas inorgánicos que de los orgánicos, me pregunto inmediatamente qué se me está escapando. El químico sueco Sture Forsén expresó muy bien su frustración por no haber podido observar las etapas intermedias de una reacción:

> El problema que encaran los científicos se ha comparado con el de un espectador que asistiese a una representación drásticamente reducida de un drama clásico —pongamos "Hamlet"—, en la que sólo le mostrasen las primeras escenas del primer acto y la escena final. Se presentan los protagonistas, se baja el telón para cambiar de decorados, y cuando sube el telón se ve un número considerable de cadáveres por el suelo del escenario y algunos supervivientes. No es tarea fácil para el inexperto la de descifrar qué ha sucedido mientras tanto.

Las ruedas no se autoensamblan de golpe. Nos queda la tarea pendiente de averiguar cómo se une todo eso hierro, cómo se tienden esos puentes químicos.

Algunos químicos, especialmente los que practican la síntesis planificada, a la manera de la que produce la tienamicina, tan exigente mentalmente, intelectualmente tan fascinante, miran con desdén el autoensamblamiento en un paso. Estas síntesis de golpe menudean en la química de estado sólido, en la formación de materiales que se extienden infinitamente en una, dos o tres dimensiones. Los buenos conductores a altas temperaturas son un buen ejemplo de moléculas que se han constituido de este modo. Su síntesis no refleja control alguno de la mente sobre la materia. Parece magia, más bien.

Exagero, pero ésta es una corriente de opinión en la comunidad química. Si pudiera arrinconar al hombre de paja, al modelo de los que se mofan del autoensamblamiento, un químico orgánico por lo habitual, y pudiera hacer que participase en un diálogo socrático, empezaría por preguntarle lo siguiente: "¿Has hecho últimamente algún diamante para



2. LA RUEDA FERRICA, conocida formalmente como $Fe(OCH_3)_2(O_2CCH_2Cl)_{10}$, ejemplifica lo ideal en química. La molécula está compuesta por hierro (*azul*), oxígeno (*rojo*) y carbono (*negro*). Para que la simetría destaque, no se muestran ni los átomos de cloro ni los de hidrógeno.

mí?" El diamante es una estructura (¡natural!) tridimensional de una bella simplicidad. Está compuesto por anillos hexapartitos, lo que es el pan nuestro de cada día de la química orgánica. Estos anillos de átomos de carbono son fáciles de crear en moléculas sueltas. Pero el diamante se puede obtener solamente con técnicas que a los químicos orgánicos les parecen poco deportivas, como las descargas en metano formadoras de plasma o el prensar grafito.

Los químicos orgánicos son maestros en ejercer control en cero dimensiones. A una pieza de carbono, quizás asimétrica, le añaden otra. Lenta, penosamente, surge una construcción compleja (la tienamicina es una fruslería comparada con lo que se puede hacer hoy). Está, además, la subcultura de los químicos orgánicos que son capaces de ejercer el control en una dimensión, los químicos poliméricos, constructores de cadenas. No recibirán en el reino de la química orgánica los honores que se merecen, pero ganan un buen puñado de dinero.

La segunda o tercera dimensiones son aún, en lo concerniente a la síntesis, absoluto desierto. El método para la obtención de estructuras extensas a la medida, inestables y persistentes, es casi inexistente. O dicho sea de forma más positiva: éste es un posible punto desde el que la química del futuro podrá crecer.

La síntesis, igual que los seres humanos, no se presta a tipologías. Cada uno es distinto; cada cual tiene sus virtudes y sus defectos. De todos podemos aprender. Dejo, aunque a regañadientes, la primaxina y la rueda férrica, y vuelvo a algunas de las cuestiones generales que ellas mismas plantean, tocantes sobre todo a la distinción entre lo natural y lo no natural.

En el arte de la síntesis se esconden dos paradojas. La primera es que la síntesis está hecha explícitamente por el hombre; por consiguiente, no es natural, aunque se intente obtener un producto ya existente en la naturaleza. La segunda, que en la síntesis de moléculas ideales, cuyo objetivo es obtener un producto no natural, a veces hay que abandonarse a la naturaleza.

El "imipenem" se obtiene de la tienamicina. Esta es natural, por supuesto, pero una decisión guiada por consideraciones químicas y económicas determinó que la versión comercial de la tienamicina se fabricase de manera sintética. La molécula natural sirvió aquí de inspiración a los químicos de síntesis. Pero, por descontado, no fabricaron la tienamicina en el laboratorio de la misma forma que el moho la sintetiza. El organismo tiene sus propias e intrincadas factorías de química, enzimas que la evolución ha configurado. No hace mucho que aprendimos a poner estas factorías, e incluso organismos enteros, a nuestro servicio, por medio de la ingeniería genética.

Nos hemos convertido en expertos en una química de laboratorio, más simple que la desarrollada por los organismos biológicos. Christensen y su equipo no pretendían mimetizar la acción enzimática del moho. Confiaban en lograr, fabricando la tienamicina en el laboratorio, una pequeña parte de lo que el humilde hongo logra. Buscaban algo natural, aunque no lo fuera el proceso seguido.

Para obtener la tienamicina, Christensen empleó abundante cantidad de reactivos naturales y sintéticos. Así, una de sus transformaciones —la síntesis del compuesto 3— usa un compuesto de magnesio, $(CH_3)_3CMgCl$, también llamado reactivo Grignard. Los compuestos de magnesio no escasean en la naturaleza (mencionemos la sal de Epsom y la clorofila). Pero el reactivo en cuestión, elemento ubicuo del químico de síntesis, fue elaborado por Victor Grignard a caballo del siglo pasado y el nuestro. La creación del compuesto 3 requiere también un tratamiento con ácido clorhídrico y cloruro amónico, productos naturales ambos. (Hay ácido clorhídrico en el estómago, aunque a una concentración mucho más baja que la que se usa en esta reacción, y el cloruro amónico es la sal amoniacal de los alquimistas.) Si bien estas moléculas se encuentran en la naturaleza, es mucho más fácil obtenerlas en una planta química.

Puesto que finalmente todo proviene de la tierra, el aire o el agua, cada reactivo no natural usado en la síntesis deriva, en última instancia, de productos naturales orgánicos o inorgánicos. La materia prima usada en la síntesis del "imipenem" es un aminoácido, el ácido aspártico.

Piensen ahora en la rueda férrica, tan hermosa cuan alejada de la naturaleza. Para obtenerla, bastó con que reaccionasen dos moléculas sintéticas, monocloroacetato de hierro y nitrato férrico, en metanol, que es un disolvente natural. El metanol procedía, a buen seguro, de otra operación de síntesis; los dos reactivos que contenían hierro derivan de reacciones de metal de hierro, que a su vez se extrae de minerales de hierro. Y como ardid final, el método de ensamblamiento, con la sensación de que las piezas de la molécula se ponen en su lugar por sí mismas (autoensamblamiento). ¿Puede haber acaso algo más natural que dejar que todo ocurra espontáneamente, al dictado de la entropía?

Está claro que en el proceso de obtención no natural de una molécula natural (la tienamicina) o de una no natural (la rueda férrica), los reactivos, naturales y sintéticos, y los disolventes desempeñan su papel como si de una intrincada y compleja función de teatro se tratase, en la que las cosas ocurrieran a su aire y, al mismo tiempo, fuesen llevadas de la mano. Casi nada permanece, a no ser el cambio, la transformación.

Podemos preguntarnos también por la psicología de la creación química. ¿En qué tipo de moléculas deberíamos gastar nuestras energías? ¿Es acaso intrínsecamente bueno el deseo de hacer algo del todo nuevo?

Cuatro bellos poliedros de carbono han despertado el interés de los químicos orgánico-sintéticos durante los últimos 40 años: el tetraedrano (C_4H_4), el cubano (C_8H_8), el dodecaedrano ($C_{20}H_{20}$) y el buckminsterfullereno

TETRAEDRANO

CUBANO

3. CUATRO POLIEDROS, basados en el carbono, cuya síntesis se ha perseguido durante décadas. Los buckminsterfullerenos se descubrieron en 1985; más tarde, se supo que se encuentran naturalmente en la Tierra. El tetraedrano, el de estructura

(C_{60}). El cubano es bastante inestable a causa de la tensión a que está sometido cada carbono. (En el cubano, el ángulo que hay entre cada tres átomos de carbono es de 90 grados, pero cada carbono "preferiría" formar ángulos de 109,5 grados con sus colaterales.) El C_{60} está también algo tensado por dos motivos: no ser plano y poseer cinco anillos pentapartitos. El tetraedrano es inestable. Hay que establecer unas condiciones muy especiales de temperatura y disolvente para verlo; incluso en esas condiciones, no se ha creado todavía la molécula matriz, sino, sólo, un "derivado sustitutivo" en el que el hidrógeno se sustituye por un abultado grupo orgánico.

Ni el tetraedrano, ni el cubano ni el dodecaedrano existen, que sepamos, en la naturaleza. El C_{60} se ha encontrado en el hollín viejo y en la shungita, una roca de gran antigüedad rica en carbón. Se quería ya sintetizar estas cuatro moléculas al menos 20 años, 50 en algunos casos, antes de que se las obtuviese realmente. Algunos de los mejores químicos del mundo intentaron obtenerlas y fracasaron. Las síntesis del cubano y, sobre todo, del dodecaedrano fueron monumentales logros de la química de los productos no naturales.

El C_{60} era distinto. Los primeros que pusieron su interés en esta agradable figura poliédrica fueron algunos teóricos. Sus cálculos indicaban que poseería alguna estabilidad, pero no siempre eran fidedignas tales indicaciones. Estos sueños de teórico eran ignorados por los experimentalistas y por los demás teóricos. A veces, cuando miramos hacia delante, es difícil ver los hombros de los gigantes sobre los que estamos subidos. Yo mismo he sugerido una modificación metálica del carbono, aún no sintetizada, distinta del diamante o del grafito, y aunque soy menos desconocido que los defensores del buckminsterfullereno, tampoco ha habido quien preste demasiada atención a mi quimérico sueño, sin duda con fundamento. Vemos sólo lo que queremos ver.

Orville L. Chapman, químico de la máxima reputación, concibió también la estructura del C_{60} y dedicó mucho tiempo a su obtención planificada y sistemática. Al fin y al cabo, ésta era una molécula "simple", no un material extenso, como el entramado repetitivo de átomos de carbono que constituye el diamante. Por tanto, debería haber sido factible la empresa. Pero no bastaron los diez años de tenaz empeño para ahorrarle el fracaso.

El primer indicio, indirecto pero definitivo, de la presencia de C_{60} se obtuvo en una rama de la ciencia muy distinta, la químico-física. El honor de este descubrimiento pertenece a Richard E. Smalley y a Robert F. Curl, de la Universidad Rice, y a Harold W. Kroto, de Sussex. Obtuvieron pruebas contundentes de la existencia de minúsculas cantidades de C_{60} en fase gaseosa, le dieron a la molécula el nombre que tiene, y, lo más importante, dedujeron su estructura. ¿Lo hicieron realmente? Sin lugar a dudas. A mí y a otros que creíamos en sus pruebas no nos preocupaba que hubieran conseguido "sólo" 10^{10} moléculas en vez de las 10^{20} necesarias para que podamos verlas constituyendo un pequeño cristal, pero los había que tenían sus dudas, y no pocos entre los orgánicos. Uno siempre quiere ver la mercancía.

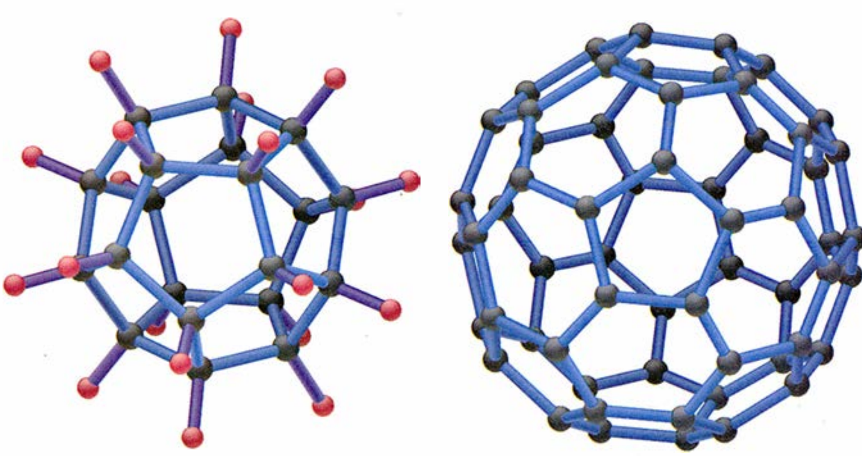
Donald R. Huffman, en Norteamérica, y Wolfgang Krätschmer y Konstantinos Fostiropoulos en Alemania sintetizaron algunos gramos de buckminsterfullereno. Tirar con arco de carbono en una atmósfera de helio (eso hicieron) es tan antideportivo como dispararle al grafito con un láser (la síntesis de Smalley-Kroto-Curl). Pero está claro que se obtiene mucho C_{60}, lo suficiente para que se pueda determinar su estructura por métodos típicamente orgánicos, el suficiente para convencer a cualquier químico de que el buckminsterfullereno tiene estructura de balón de fútbol.

A muchos les hubiera gustado que el C_{60} se hubiera obtenido de una forma planificada y no natural. Me hace feliz —porque el mundo sea algo menos racional de lo que nos gustaría que fuera— que se obtuviese casualmente, por carambola.

Pero la fortuna bendice sólo a los que la buscan, se trate de una síntesis química o de un alfarero japonés que amontone en el horno materia orgánica alrededor de sus cacharros. Has de tener los conocimientos (algunos le llaman intuición) necesarios para variar de tal o cual manera las condiciones en que se tira con el arco o la disposición de las hojas en el horno. Has de tener a tu disposición los instrumentos y la intuición precisas para deducir la estructura a partir de unas líneas borrosas en un espectro y desechar las pistas falsas. Y has de tener la valentía de hacer añicos un jarrón que no ha salido bien y aprender de cada hornada lo que se debe hacer en la siguiente.

Muchas síntesis químicas, aunque formen parte de un gran diseño, constan de pasos fortuitos. Uno quiere cerrar un enlace aquí, pero eso no funciona. Así que tienes que seguir un presentimiento, es decir, haces cualquier cosa menos atenerte al método científico canónico. Sabes que si una reacción funciona, podrás luego dar una explicación racional de por qué ha sido así e impresionar a tus colegas. Podrás luego hacer que la condenada reacción funcione, si es que se trata de un paso necesario en el diseño.

Como el azar no deja tampoco de maquinar para que se frustre el diseño que sea, es casi seguro que en el desarrollo de cualquier síntesis planificada habrá un paso que no funcionará con ningún proceso conocido. Se inventará otro nuevo, que engrosará el arsenal de los químicos



más simple, todavía no se ha sintetizado. El tetraedrano, el cubano y el dodecaedrano están formados por átomos de carbono (*negro*) e hidrógeno (*rojo*), los buckminsterfullerenos, de carbono solo.

y servirá luego a los que en cualquier parte del mundo se enfrenten al mismo problema. Algunos químicos de síntesis —por ejemplo E. J. Corey, un gran maestro de este arte— tienen un talento especial no sólo para obtener moléculas valiosas, sino también para utilizar la oportunidad que les brinda la síntesis y crear un método brillante, sin precedentes, aplicable a otras síntesis.

Cuando la síntesis está planificada, tanto si el objetivo es la obtención de una molécula natural como si se busca la producción de una que no lo es, suprimimos de la empresa que vamos a acometer la parte aleatoria de su naturaleza. Queremos proyectar una imagen de supremacía de la mente sobre la materia, la imagen de un control total. Cuando la molécula obtenida no es la esperada, como ocurrió con la rueda férrica, se nos hace muy difícil esconder el obrar de la suerte. Pero no hay síntesis en la que el azar no represente un papel vitalizador, nunca reconocido.

Volvamos a la naturaleza y a nuestros esfuerzos por emularla. O por superarla. ¿Podemos crear sustancias que tengan propiedades superiores a las que se encuentran en la naturaleza? Yo digo que "sí", reconociendo al mismo tiempo que la frase "superior a la naturaleza" es, a todas luces, un juicio de valor antropocéntrico, y que no puede ser dicha sin que se nos despierten a la vez inquietudes ecológicas.

En las redes de pescar se utiliza nylon en vez de algodón, en las medias nylon en vez de seda. Nadie volverá a usar las viejas redes, y menos que nadie los pescadores del Tercer Mundo. Las habrá que vuelvan a las medias de seda, pero serán ricas, y lo harían para impresionar. Hay nuevos materiales químicos y nuevas combinaciones de antiguos materiales para las reparaciones dentales. Gracias a ellos, la vida de los viejos ha cambiado radicalmente. Los beneficios que comportan no se pueden ignorar.

Sin embargo, creer que podemos hacer las cosas mejor que la naturaleza es un acto de arrogancia. Intentando mejorar la naturaleza (mientras fracasábamos en el control de lo más natural que hay en nosotros, nuestra inclinación a procrearnos), hemos generado tantos cambios, y en tal medida, que hemos echado a perder nuestro propio nido e interferido en los grandes ciclos de este planeta. Debemos enfrentarnos a esta realidad: que la evolución natural es demasiado lenta para asimilar los cambios que producimos. Esta inquietud debería guiar la síntesis química industrial del futuro tanto como las consideraciones utilitarias.

Pero hay una arrogancia de otro tipo implícita en el drama intelectual de la síntesis. Alain Sevin, químico francés, ha expresado muy bien en qué consiste:

> La increíble riqueza y fantasía de la Naturaleza son desafíos arrojados al Hombre, como si éste tuviera que superarla en cualquier campo. Volar más deprisa que las aves, sumergirse en aguas más profundas que las ballenas... Somos personajes prometeicos en un drama sin fin, que se encuentra ahora en un acto en el que las moléculas tienen los papeles más importantes.

Si hubiese que dar a la síntesis química una imagen que la simbolizase, sería adecuada la de la mano extendida de Prometeo ofreciendo fuego a la humanidad. Prometeo, nombre que significa "previsión", representa lo que tiene la síntesis de designio, ese su saber sacar partido de creaciones casuales. El fuego es apropiado también, pues es motor de transformaciones. La mano de Prometeo simboliza la creación —la mano de Dios que se extiende hasta tocar a Adán en el fresco de Miguel Angel, las manos en contencioso debate en el "Cristo entre los doctores" de Durero, la infinidad de manos esculpidas por Rodin. Las manos bendicen, acarician y ocultan, pero, sobre todo, dan forma a las cosas.

El propio arte del escultor imita el complejo movimiento de los químicos en esa interfase entre naturaleza y no naturaleza que es su elemento. Rodin, en su proceso humano de creación, en primer lugar esboza, moldea luego a mano (con herramientas) un objeto a escala no natural sin perder "realismo", la escultura de una mano, hecha con materiales sintéticos (bronce), cuyo origen, sin embargo, es natural (cobre o minerales de estaño). En sus estadios intermedios, su proceso de construcción (maquetas, moldes) es complejo. El escultor crea algo muy real, cuyo valor quizá resida en despertar en nuestra mente lo ideal.

Margaret Drabble ha escrito que Prometeo está "firmemente enraizado en el mundo real del esfuerzo, el peligro y el dolor". Sin la síntesis no habría fármacos; sus éxitos están indisolublemente vinculados a nuestra ansia por romper los grilletes de la enfermedad y la pobreza. En busca de un ideal, construyendo realidades, mente y manos se unen.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A STEROCONTROLLED, ENANTIOMERICALLY SPECIFIC TOTAL SYNTHESIS OF THIENAMYCIN. T. N. Salzmann, R. W. Ratcliffe, F. A. Bouffard y B. G. Christensen en *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Serie B, vol. 289, n.º 1036, págs. 191-195; 16 de mayo de 1980.

MOLECULES. Peter W. Atkins. Scientific American Library, 1987.

THE LOGIC OF CHEMICAL SYNTHESIS. E. J. Corey y Xue-Min Cheng. John Wiley and Sons, 1989.

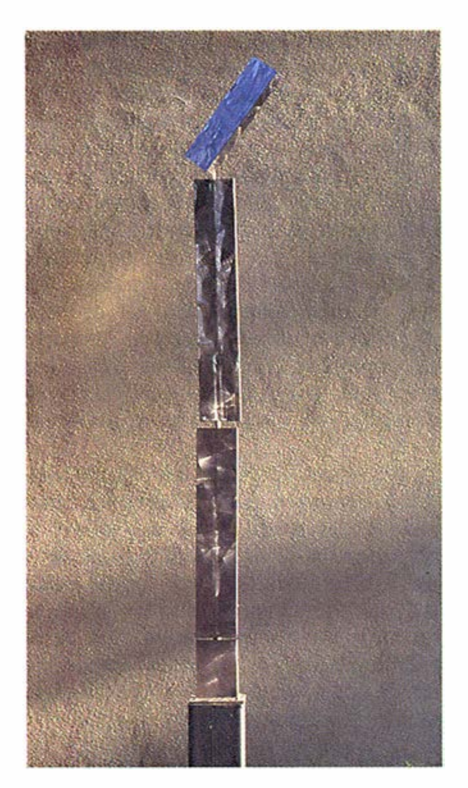
SYNTHESIS AND STRUCTURE OF Fe $(OMe)_2(O_2CCH_2Cl)_{10}$, A MOLECULAR FERRIC WHEEL. Kingsley L. Taft y Stephen J. Lippard en *Journal of the American Chemical Society*, vol. 112, págs. 9629-9630; 19 de diciembre de 1990.

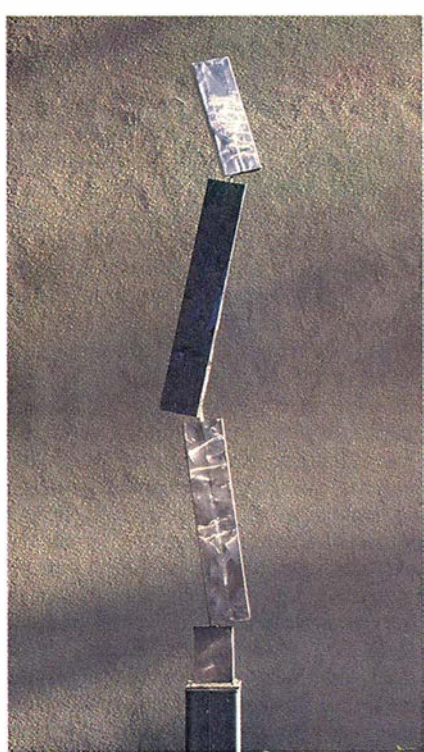
THE ORGANIC CHEMISTRY OF DRUG DESIGN AND DRUG ACTION. Richard B. Silverman. Academic Press, 1992.

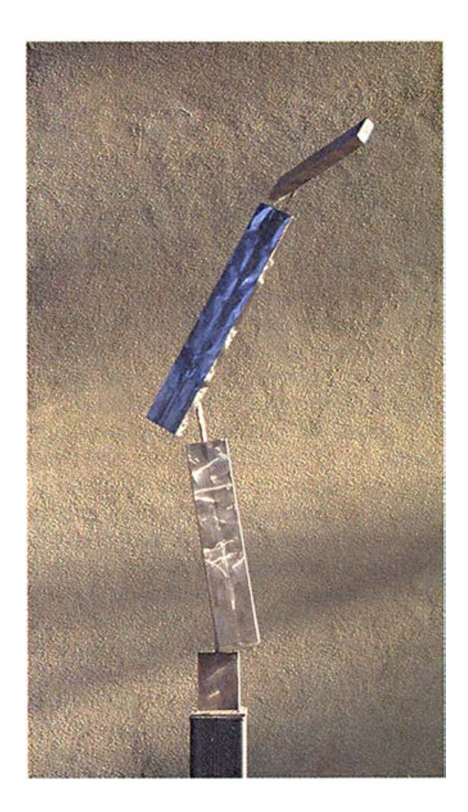
Técnica y arte cinético

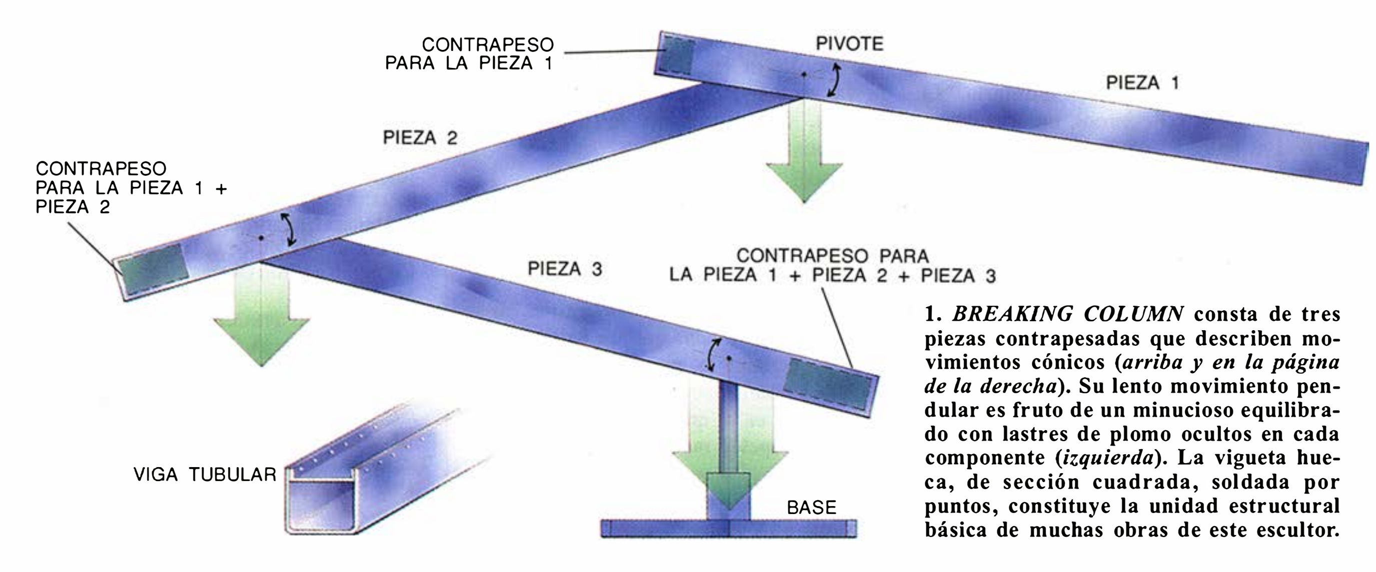
Tan delicado es el juego de pesos y equilibrios de las esculturas del autor, que el más ligero soplo de viento hace que sus partes bailen

George Rickey

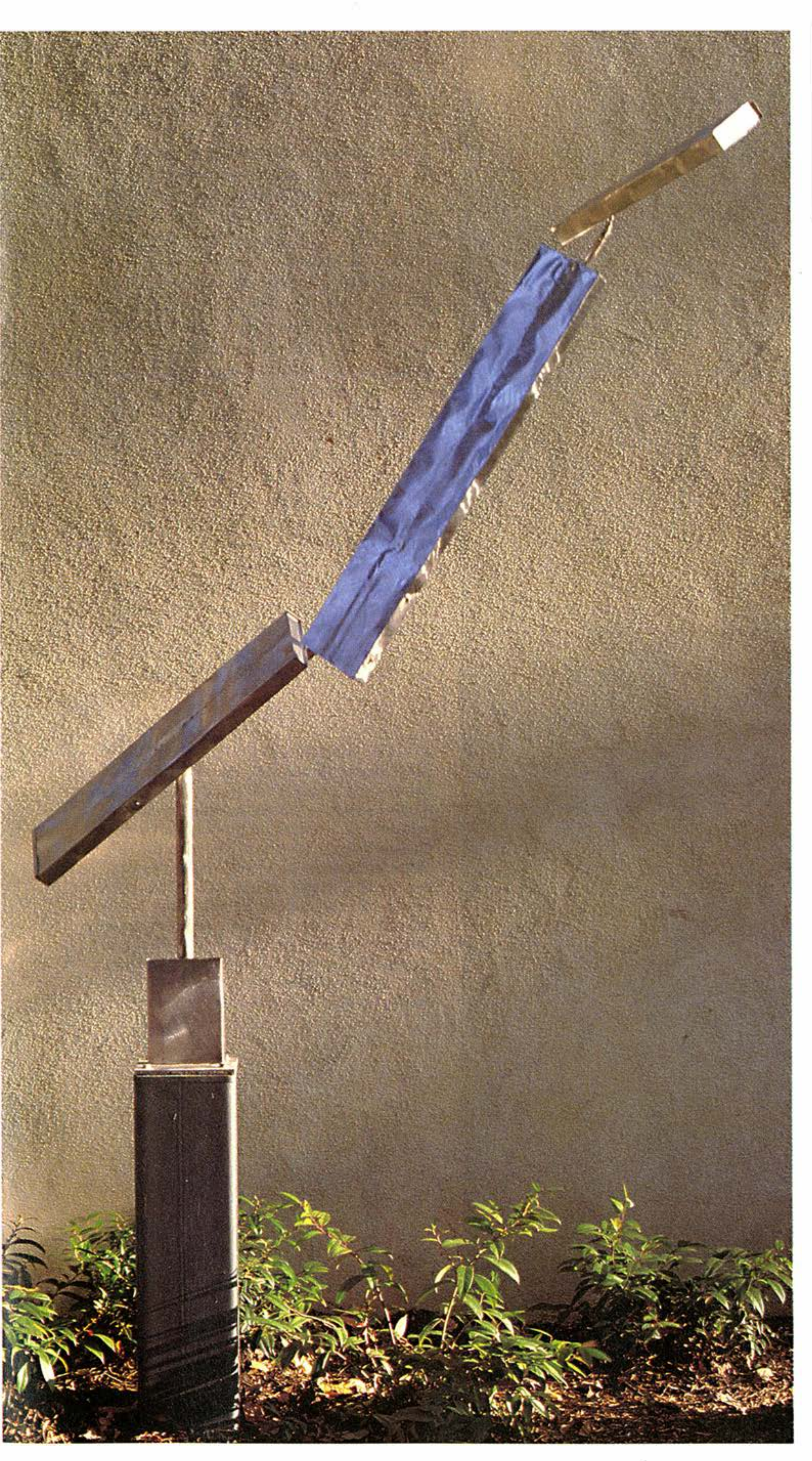








1. *BREAKING COLUMN* consta de tres piezas contrapesadas que describen movimientos cónicos (*arriba y en la página de la derecha*). Su lento movimiento pendular es fruto de un minucioso equilibrado con lastres de plomo ocultos en cada componente (*izquierda*). La vigueta hueca, de sección cuadrada, soldada por puntos, constituye la unidad estructural básica de muchas obras de este escultor.

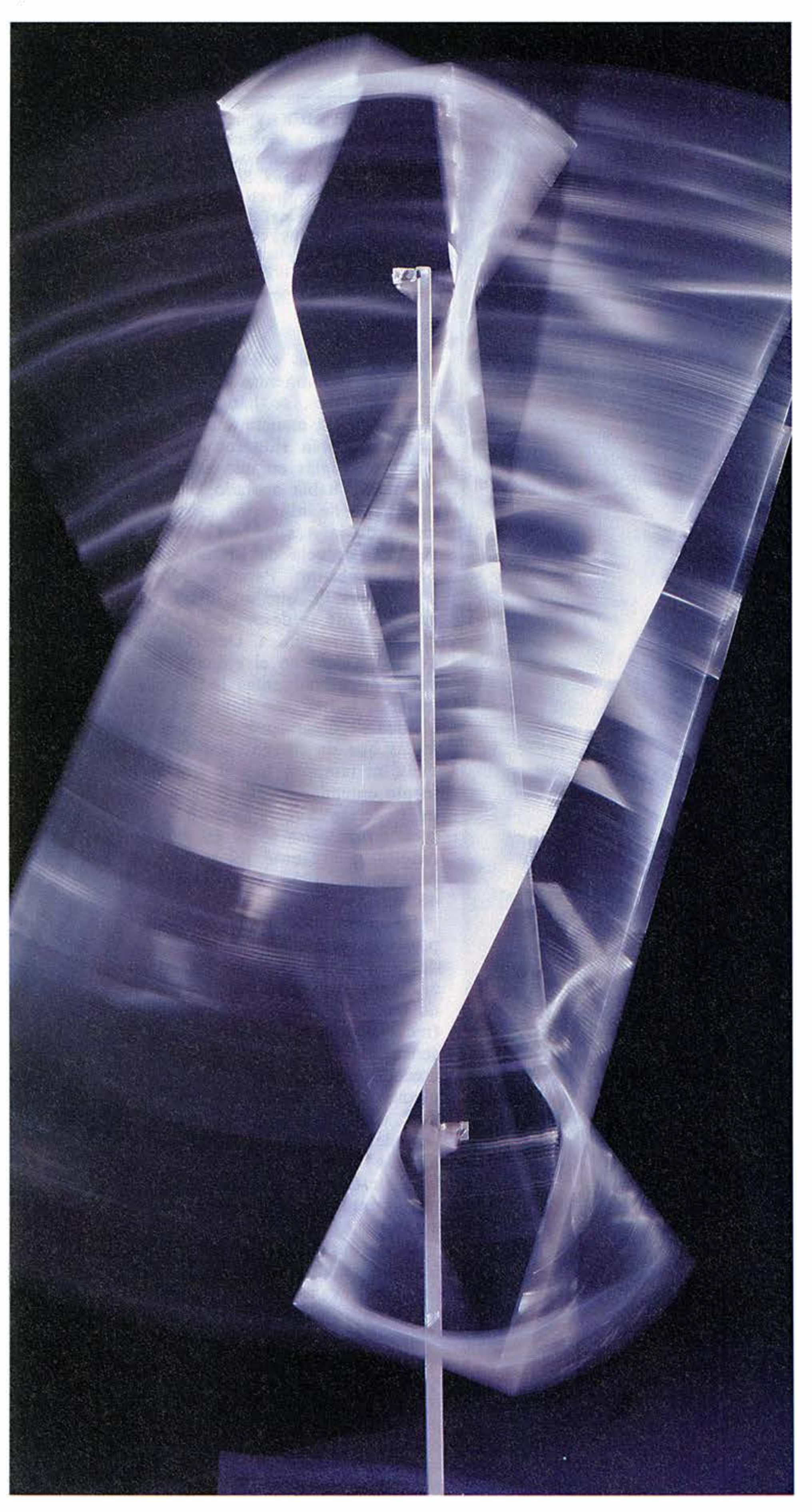


GEORGE RICKEY ha dedicado los últimos cuarenta años a desarrollar sus esculturas cinéticas. Nació en 1907 en South Bend, Indiana. Se han hecho exposiciones y retrospectivas de su arte en la Galería Nacional de Berlín (1973), en el Museo Guggenheim (1979), en Glasgow (1982) y en el Martin Gropius Bau de Berlín (1992).

Mis ideas artísticas, como los movimientos de mis esculturas, se han ido desarrollando de una manera azarosa. A mis 22 años, había sido recadero, había enseñado inglés en una academia de idiomas y había agotado los ahorros que tenía de niño por asistir a las clases de la Academia Lothe en París, una escuela de pintura influida por el cubismo. Pasarían aún trece años antes de que en mis dedos y en mi mente se despertase la querencia por la mecánica. Ocurrió cuando presté servicio en el ejército. El trabajo con herramientas industriales y material militar me llevó a acariciar la idea de crear construcciones dinámicas que no fueran esculturas estáticas, ni tampoco lo que tradicionalmente entendemos por móviles. Después de la guerra, me dispuse a transformar estas ideas en realidades tangibles. Presenté mi primera exposición en 1953, cumplidos ya los 46 años.

He continuado desde entonces explorando las posibilidades estéticas de la escultura cinética. En mis piezas más recientes, suelo suspender de un elemento móvil otro, que con frecuencia es una figura geométrica sencilla —una varilla o un cubo—, creando así dispositivos doble o triplemente articulados. La distribución casi exactamente equilibrada del peso les hace que respondan incluso al más leve soplo de aire, que les hará describir circunvoluciones lentas, impredecibles, expresivas sin embargo.

Mis obras funcionan como péndulos modificados. Los péndulos compuestos llevan pesos por encima y por debajo del pivote, o fulcro, alrededor del que oscila la varilla principal. En un péndulo simple, el período de oscilación depende sólo de la longitud del péndulo; en uno compuesto, se puede controlar el período de oscilación modificando la distribución de masas; a mayor peso sobre el fulcro, más lenta la oscilación. Cuando el producto del peso por la



distancia sobre el fulcro va haciéndose igual al producto del peso por la distancia que hay debajo, el período se alarga y tiende a infinito; el péndulo compuesto se vuelve inestable. Revestido con otra forma, semejante péndulo se convierte en un objeto muy familiar: la rueda.

Para lograr movimientos pausados y líricos, juego con distribuciones de pesos y distancias al límite de la inestabilidad; en una de mis esculturas, el balanceo de ida puede llevar 20 segundos o más. Esas distribuciones poseen otra característica notable: cuando la distribución de pesos se aproxima a la inestabilidad, las fuerzas necesarias para poner el péndulo en movimiento disminuyen hasta anularse casi. Un soplo de brisa que suavemente agita las hojas moverá también una de estas esculturas, con sus 500 kilos de peso. El control del peso y el equilibrio —y del tiempo además— me proporciona un medio de expresión como el color lo es para el pintor o la tonalidad para el compositor.

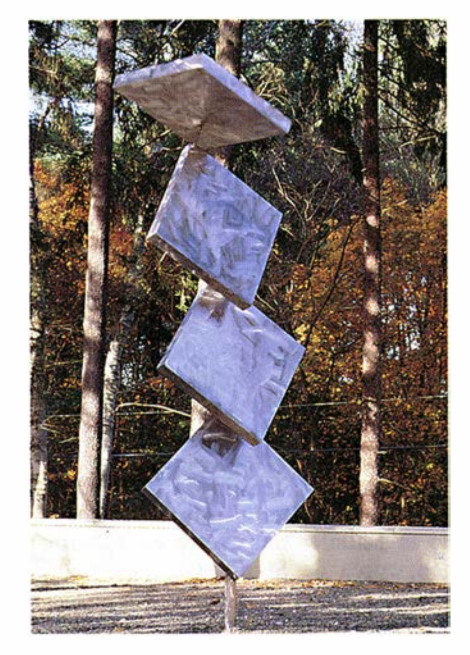
Gran parte de mi empeño ha estado encaminado a escapar del emparedamiento del movimiento en un plano. Hace veinte años, esforzándome en dilatar las posibilidades ex-

2. LOS PENDULOS COMPUESTOS constituyen la base de las esculturas de Rickey. El período de oscilación de un péndulo simple (*abajo*) depende exclusivamente de su longitud; el período de un péndulo compuesto (*derecha*) depende del producto de la masa por la distancia que haya por arriba y por abajo del fulcro. Los péndulos compuestos debidamente compensados oscilan morosos, impelidos por fuerzas diminutas. Una fotografía con exposición prolongada de *Open Triangles One Up One Down* (*a la izquierda*) evidencia sutiles movimientos de vaivén.

PENDULOS SIMPLES

LONGITUD: 1 METRO
PERIODO: 1 SEGUNDO

LONGITUD: 2 METROS
PERIODO: $\sqrt{2}$ SEGUNDOS





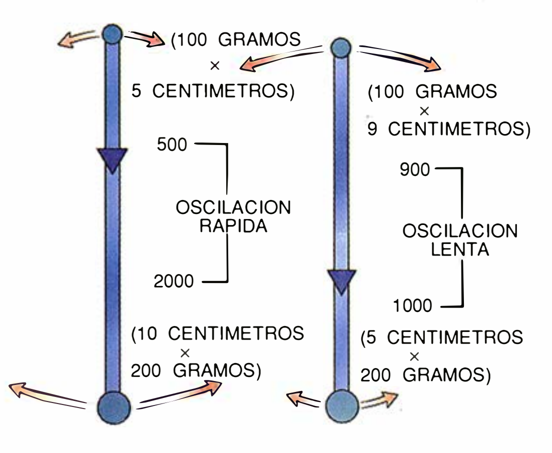


3. CUADROS CONCATENADOS: son el resultado de los experimentos escultóricos que Rickey ha emprendido recientemente. Cada elemento de *Column of Four Squares Excentric Gyratory III* está lastrado y montado sobre un cojinete en ángulo. El fuste que vemos al pie traslada todo el peso a una base estable.

presivas del movimiento, probé a cambiar el eje de rotación en el fulcro del péndulo, inclinándolo 45 grados, en lugar de los 90 habituales. La trayectoria resultante recorría una superficie cónica, en vez del arco plano que conoce quienquiera que haya subido en un columpio.

Para conseguir respuestas controladas y sensibles es imperativo el ajuste cabal de la distribución de masas. El peso acumulado en una serie de piezas concatenadas (las barras rígidas, los cojinetes y contrapesos) ha de equilibrar el contrapeso de la pieza más interior. No se completará la escultura a menos que dicha pieza sea lo bastante grande para alojar un contrapeso suficiente. Recíprocamente, el espacio disponible para la inserción del lastre en la pesada pieza interior determina las dimensiones máximas de la más exterior.

PENDULOS COMPUESTOS



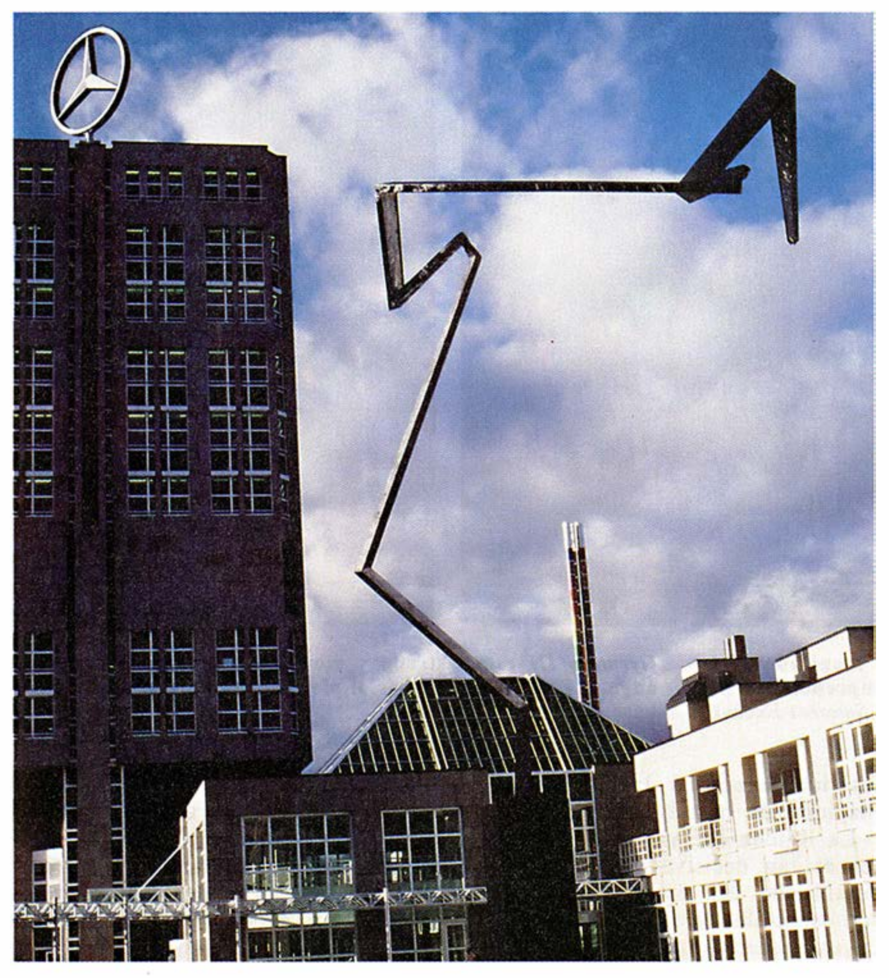
La rigidez de las vigas estructurales es tan decisiva como el exacto equilibrado del sistema; una y otro son esenciales en la génesis de obras cuyos despaciosos movimientos obliguen al observador a esperar y admirar. Al mismo tiempo, quiero que los elementos más livianos de mis esculturas cinéticas sean, a los ojos del espectador, indistinguibles de los más pesados. Estas consideraciones me han llevado a emplear una viga tubular de sección cuadrada, que construyo soldando dos piezas de acero en forma de U.

Mis diseños exigen también que la fricción en las articulaciones se reduzca al mínimo; un rozamiento excesivo provocaría la extinción prematura de los vaivenes de la escultura suspendida. Los fulcros de cuchilla, como los utilizados en las balanzas de laboratorio, tienen una fricción insignificante, pero pueden desgastarse rápidamente o deteriorarse por la lluvia y los vientos fuertes. En las obras concebidas para exteriores empleo rodamientos de bolas, que toleran la exposición a la intemperie y a los tiempos inclementes. Sin embargo, los cojinetes de bolas requieren engrase, y la viscosidad del lubricante puede amortiguar el movimiento en caso de que la brisa sea muy suave.

A causa de la naturaleza de los equilibrios, me veo obligado a construir las esculturas de fuera adentro. En las obras de dos piezas, empiezo equilibrando la unidad exterior, más ligera, y la conecto a su vecina interior, que debe portar contrapeso suficiente para equilibrar los dos componentes. Inserto después el eje, ubicado en el centro de equilibrio del montaje, en un soporte que sea capaz de transmitir el peso total de la estructura al suelo, la pared o el techo.

En 1985 se me invitó a que contribuyese a la conmemoración del 750 aniversario de la fundación de Berlín, que tendría lugar en 1987, con una obra que se exhibiría allí, junto a la iglesia del Recuerdo. Esta oportunidad me indujo a llevar mis técnicas más allá. Con anterioridad había ya articulado una pieza rectilínea con otra, formando un codo. ¿Podría ahora articular un cono con un cono, como ocurre en la muñeca o en el hombro? Internándome en este nuevo territorio, monté un componente anguloso sobre otro. Cada pieza giraba alrededor de un eje que formaba un ángulo de 45 grados con respecto a la dimensión mayor; la estructura entera se montaba sobre un soporte zigzagueante. El viento balancearía las piezas, que describirían conos virtuales a punto casi de chocar unas con otras y contra el soporte, así que ajusté los pesos de manera que se produjesen suaves movimientos a lo largo de unas trayectorias que parecían presagiar inevitables colisiones. Era mi ambición que quien mirase se preguntase qué iba a suceder, cuándo y dónde.

No podía dibujar una obra cuatri-



4. LOS PROYECTOS PUBLICOS han impulsado nuevas exploraciones artísticas. La escultura construida para el 750 aniversario de la fundación de Berlín (*arriba*), hoy ubicada cerca de Stuttgart, consta de dos piezas con forma de zigzag, que tienen libertad para moverse según trayectorias cónicas. Una obra posterior, proyectada para la fachada de un teatro, en Rotterdam (*abajo*), planteaba una dificultad técnica superior, porque cada miembro de la tríada posee tres partes móviles.



dimensional como ésta. Procedí mediante ensayos y errores, aprendiendo con una versión miniaturizada antes de trabajar a escala natural. Ensanché las unidades interiores para alojar en ellas más plomo; recorté agujeros en los refuerzos para reducir peso. Los requisitos físicos de la escultura impusieron el tamaño y la forma general de la mayor de las dos unidades. Después, por armonía visual, modifiqué las formas y contornos donde las consideraciones estructurales lo permitían. La forma definitiva vino dictada por un diálogo entre los apetitos de la vista y las restricciones técnicas.

La escultura terminada permaneció dos años en Berlín. Hoy, propiedad de la Daimler-Benz, está en Möhringen, cerca de Stuttgart.

Mientras trabajaba en la escultura de Berlín, el arquitecto de un teatro de nueva construcción en Rotterdam me preguntó si me interesaría hacerles el proyecto de una escultura para la fachada. Me envió planos y alguna información sobre el lugar. Hallábase el teatro rodeado por edificios de viviendas, de seis alturas; mi fachada estaba dominada por tres cuadros de 10 por 10 metros, construidos con listones en doble T, que sobresalían cinco metros del plano de la fachada. Con palillos de madera remedé un conjunto de unidades largas y esbeltas, concatenadas por ejes a 45 grados entre sí, con la intención de generar movimiento a lo largo y hacia afuera de los quince metros de altura de la fachada del teatro, un movimiento que llenase el espacio definido por las vigas en doble T. Cada articulación tenía su fulcro en su vecina, con vistas a generar movimientos cónicos en tres niveles.

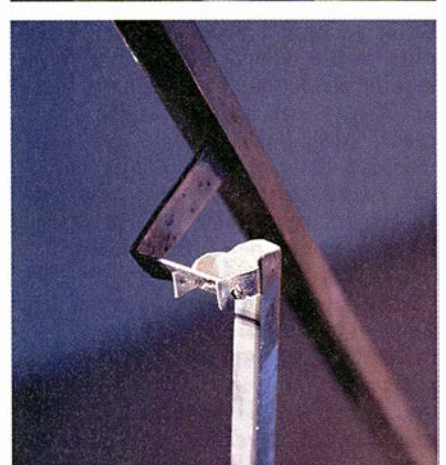
En su versión definitiva, la escultura consta de tres columnas compuestas cada una por cuatro segmentos concatenados. El más corto es un robusto plinto, anclado con pernos a la viga en doble T de cada cuadrado de acero. Cada soporte sostiene una columna de unos seis metros de altura y 35 por 18 centímetros de sección transversal, constituida por los otros tres segmentos. La columna central se eleva de su soporte, y las laterales penden del suyo, un eco, tal vez, de la tradicional disposición del grupo de las Tres Gracias.

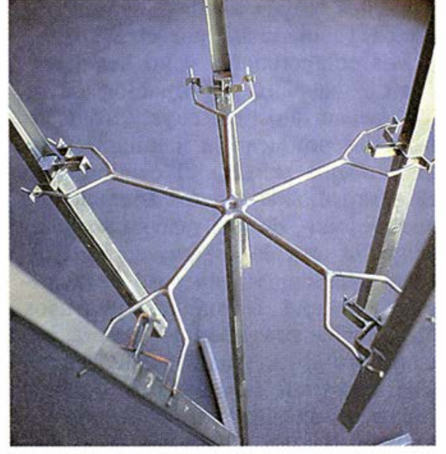
Desde la terminación de la obra de Rotterdam he continuado explorando las posibilidades de las estructuras de varios componentes, con articulaciones a 90 y a 45 grados, pero no he dejado por ello de emprender

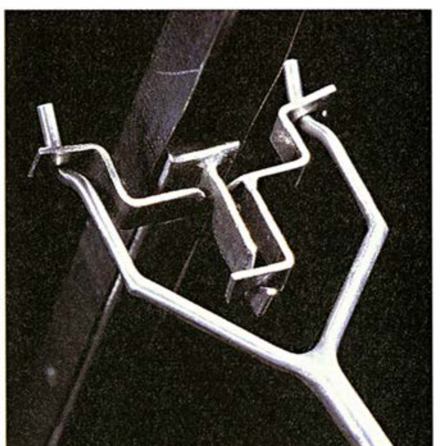
5. **EL DISEÑO de los cojinetes determina la libertad de movimiento de las esculturas y su duración. Las obras para interiores pueden servirse de fulcros de cuchilla como los mostrados en las fotos de abajo. Las obras para exteriores requieren cojinetes de bolas encapsulados (*abajo*), de rozamiento mínimo, para que haya movimiento incluso en la brisa más leve. Para determinar los movimientos de sus esculturas, el autor se vale de modelos a escala (*derecha*).**











exploraciones cinéticas más sencillas. He montado, por ejemplo, un conjunto de cuatro cuadros de forma que describan un movimiento cónico orientado hacia el exterior, como los pétalos de una flor. Este motivo "pétalo de flor" me ha encaminado por dos direcciones: hacia columnas que constan de una pila de cuadros rotatorios y hacia una disposición de cubos giratorios apiñados.

Había probado ya a montar un cuadro sobre otro, girando alrededor de un eje inclinado 45 grados. Emplacé en esta ocasión tal montaje sobre otro cuadro, también a 45 grados, y después, estos tres sobre un cuarto cuadro que se desplazaba según un eje vertical. Cada cuadro describe una trayectoria cónica que se dirige hacia el exterior del situado por debajo. Al girar los cuadros, la figura a modo de columna resultante da la impresión de que se hace pedazos y se vuelve a recomponer, en un efecto de desintegración y reintegración. Mostré una de tales obras en la exposición de Katonah; otra mayor hállase erigida junto al nuevo Ayuntamiento de Tokio.

Tras mis experimentos con estos cuadros giratorios comencé a reflexionar en lo que podría ocurrir si convertía los cuadros en cubos. Descubrí que, si los hacía girar en torno a la diagonal principal, habría espacio suficiente para que no chocasen. Pero, ¿sería un cubo tan aerodinámico que una leve brisa bastase para ponerlo en movimiento? Construí un modelo experimental, y vi que, despacio, despacio, me iba diciendo que sí. Pude, pues, exhibir en Katonah un grupo de cuatro cubos en rotación. Una versión ampliada y más perfecta de este racimo de cubos fue instalada el otoño pasado junto al ala oriental de la Galería Nacional de Washington.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CONSTRUCTIVISM: ORIGINS AND EVOLUTION. George Rickey. George Braziller, 1967.

GEORGE RICKEY. Nan Rosenthal. Harry N. Abrams, 1977.

GEORGE RICKEY: ART OF MOVEMENT. Ensayos de G. Rickey, N. Rosenthal y J. Snyder. Museo de Arte de Katonah, 1991.

Superación de la barrera hematoencefálica

El desarrollo de una terapia para la meningitis nos ha revelado cómo se las ingenian las bacterias para cruzar la barrera hematoencefálica. ¿Será la clave para abordar otras enfermedades del cerebro?

Elaine Tuomanen

Pocas frustraciones se dan en medicina que igualen la que experimenta el neurólogo cuando, teniendo en sus manos un fármaco potente a una uña del foco infeccioso o de un tumor, se reconoce incapaz de llegar hasta el mismo. De todos los órganos, el cerebro es el único que permanece inaccesible a la quimioterapia. Las paredes de los vasos sanguíneos están fenestradas, cual muros de piedra agrietados, salvo las que recubren los vasos del cerebro, que se asemejan a un muro de cemento armado absolutamente impermeable. Esta pared, que recibe el nombre de barrera hematoencefálica, permite el paso de la glucosa y de pocas sustancias más, pero mantiene alejados a los intrusos, sean éstos amigos o enemigos.

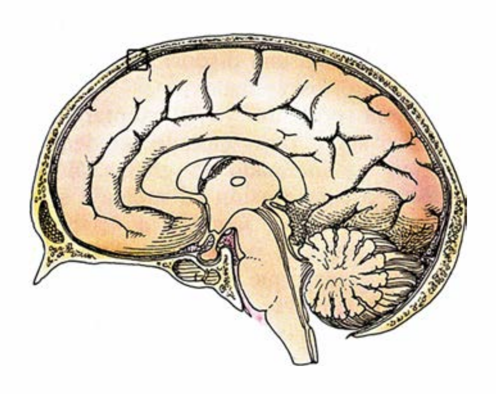
Mas, como sucede en todas las batallas, los espías pueden infiltrarse a través de líneas infranqueables para el ejército regular. Ciertas bacterias se las arreglan y lo consiguen: se cuelan por la barrera hematoencefálica e infectan el líquido cefalorraquídeo. Provocan la meningitis bacteriana, la más temible de todas las infecciones de la infancia y una de las causas frecuentes de mortalidad del mundo entero, lo mismo entre niños que entre adultos. Por citar una cifra, en los Estados Unidos ataca a unas 50.000 personas cada año; hasta épocas recientes mataba hasta un tercio de sus víctimas y dejaba sordos o paralíticos a más de la mitad de los que se salvaban. Los números se elevan si hablamos de pacientes cuyo sistema inmunitario estaba ya mermado por el SIDA.

Mis colaboradores y yo hemos recogido bastante información sobre los mecanismos en cuya virtud las bacterias producen la meningitis. Estos trabajos señalan el camino para el desarrollo de nuevos tratamientos que mejoran, de una manera sorprendente, la tasa de supervivencia. Quizá nos hallemos a un paso de averiguar de qué forma los instrusos bacterianos atraviesan la barrera hematoencefálica; cuando tal ocurra, será más firme la esperanza de aprovechar la añagaza con el fin de introducir fármacos a través de la barrera hematoencefálica, exponiendo así los tumores cerebrales y tejidos afectados por la enfermedad de Alzheimer a todo el arsenal de la medicina moderna.

ELAINE TUOMANEN dirige el laboratorio de enfermedades infecciosas de la Universidad de Rockefeller, en cuyo hospital clínico presta también servicio médico. Se formó en la Universidad de McGill, donde obtuvo el doctorado en medicina en 1977. Tras algunos años de especialización en pediatría, se entregó por entero al estudio de las enfermedades infecciosas, primero en la Universidad de Virginia y luego en la Rockefeller. Forma parte del claustro de esta última universidad desde 1984.

Son tres las bacterias que causan meningitis: *Hemophilus influenzae*, *Neisseria meningitidis* y *Streptococcus pneumoniae*. El *H. influenzae* (pese a su nombre, sin relación ninguna con la gripe) era el más frecuente hasta 1990, cuando la difusión de una nueva vacuna se propuso borrarlo del mapa. El meningococo, o *N. meningitidis*, sigue siendo la causa de epidemias en Africa, donde la vacuna tiene aún una escasa distribución. El más traicionero de estos gérmenes es el neumococo, o *S. pneumoniae*, culpable además de la neumonía y de infecciones del oído medio. Hasta hace dos años, la meningitis neumocócica mataba hasta un 30 por ciento de los niños infectados, independientemente de la intensidad del tratamiento. Fue entonces cuando mi laboratorio descubrió la manera de rebajar tamaña mortalidad a menos del 5 por ciento.

Las tres formas de meningitis bacteriana siguen un curso idéntico. No tarda el paciente en sufrir la fiebre, irritabilidad y somnolencia características de la gripe causada por virus. Sigue, a esos síntomas, la inflamación del cerebro, que provoca ataques, conduce al estado de coma y, en muchos casos, desemboca en la muerte. El médico busca, por tanto, los signos sutiles de la meningitis; sobre todo, una sensación de rigidez en el cuello. La mera sospecha de la enfermedad se convierte ya en urgencia médica, que obliga a administrar al paciente antibióticos por vía



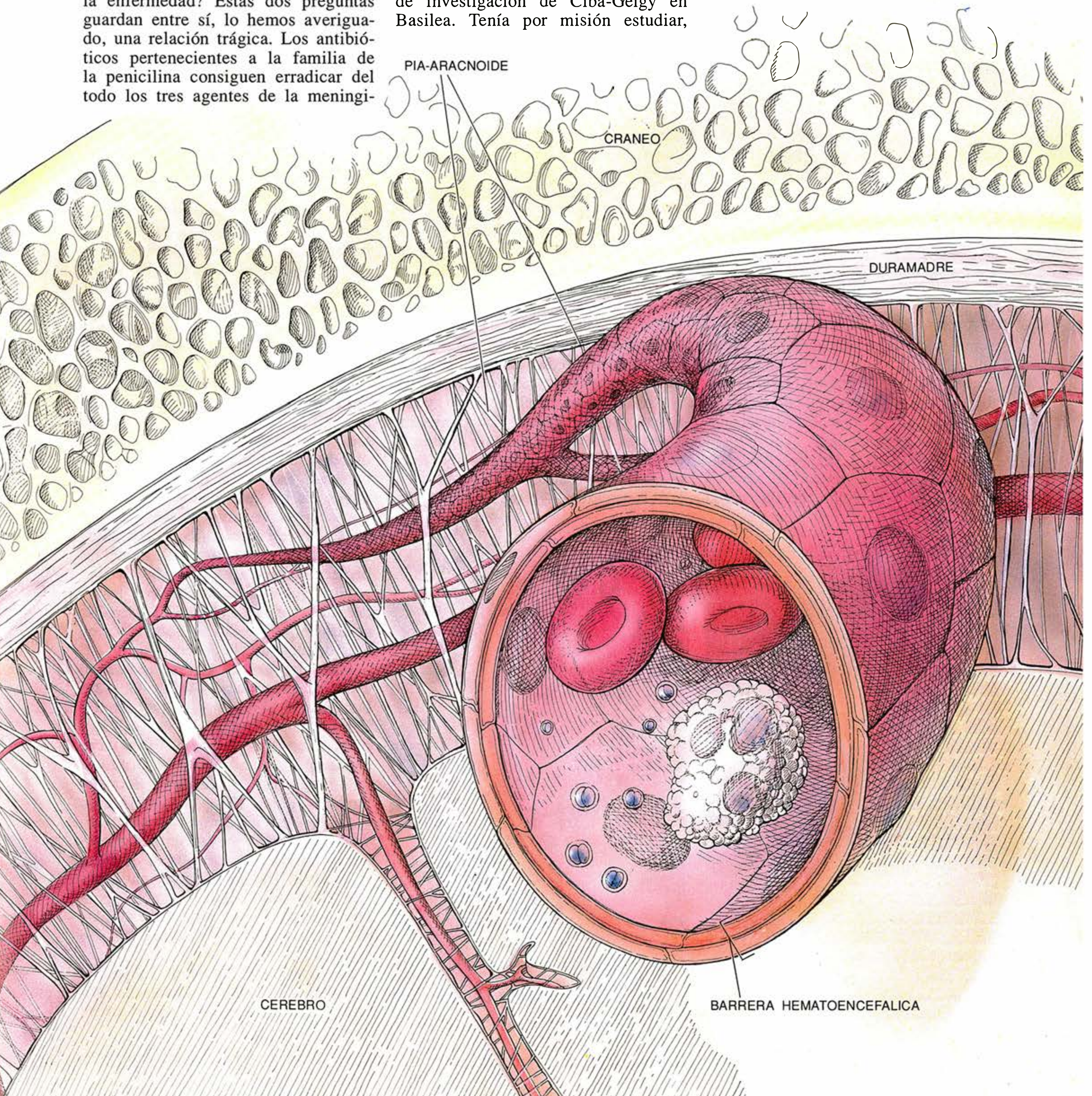
1. BARRERA HEMATOENCEFALICA, un compacto revestimiento del sistema vascular del cerebro que impide el paso a la mayoría de las sustancias. La meningitis se produce cuando las bacterias presentes en la sangre atraviesan dicha frontera, de suyo infranqueable, y se multiplican en el líquido cefalorraquídeo.

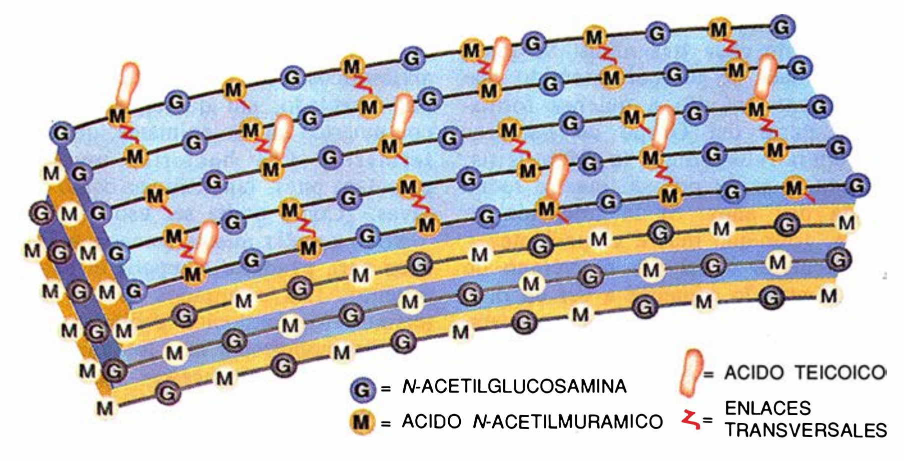
intravenosa, sin dilación. Cuando los antibióticos se administran en dosis muy altas, éstos consiguen atravesar la barrera hematoencefálica y matar la mayoría de las bacterias. Pero el médico tiene que mezclar y administrar todo un cóctel de fármacos; no se puede permitir el lujo de esperar un solo día para identificar al invasor y elegir el antibiótico específico.

El intervalo de las 24 horas siguientes plantea dos cuestiones del máximo interés: ¿Consigue el antibiótico matar las bacterias? y ¿logrará sobrevivir el paciente afectado por la enfermedad? Estas dos preguntas guardan entre sí, lo hemos averiguado, una relación trágica. Los antibióticos pertenecientes a la familia de la penicilina consiguen erradicar del todo los tres agentes de la meningitis, pero ello no obsta para que muera uno de cada tres niños. Se trata, en verdad, de un contrasentido que nos tiene en vilo a quienes formamos parte del Grupo de Estudios Cooperativos sobre la Meningitis, una asociación privada que se reúne cada dos años. Si la infección se cura, ¿por qué muere el paciente?

Recuerdo aquel día de verano de 1984, cuando comencé a ver un rayo de luz en el camino de la respuesta. Alexander Tomasz, colaborador mío, me llamó desde Suiza, donde pasaba un año sabático en los laboratorios de investigación de Ciba-Geigy en Basilea. Tenía por misión estudiar, en un modelo animal de meningitis, el mecanismo a través del cual los antibióticos matan las bacterias. Había inyectado, sin querer, neumococos muertos en los animales, que enfermaron. Las bacterias muertas parecían, pues, tan dañinas como las vivas. ¿Cómo podía ser eso?

Volé, aquella misma semana, a Basilea para ayudarle a repetir el experimento. Los resultados fueron los mismos. Mi formación pediátrica me permitía comprobar que los animales —conejos, en este caso— presenta-





2. LA PARED DE LA CELULA BACTERIANA está constituida por una sola molécula con enlaces transversales, una porción de la cual aparece arriba en forma simplificada. La penicilina hace estallar la pared en millones de sus 20 elementos componentes, cada uno de los cuales contribuye a un síntoma de la infección.

ban los síntomas propios de niños afectados de meningitis bacteriana.

A lo largo de los dos años siguientes, Tomasz y yo construimos un guión del curso seguido por la meningitis; partíamos del modelo de la enfermedad en el conejo que Ralph G. Dacey, Jr., y Merle A. Sande habían desarrollado a comienzos de los ochenta en la Universidad de Virginia. Proponíamos que los cadáveres bacterianos no mataban directamente, sino que espoleaban al organismo, arrastrándolo hacia una furia autodestructiva, fuente genuina de los síntomas y de las consecuencias de la enfermedad.

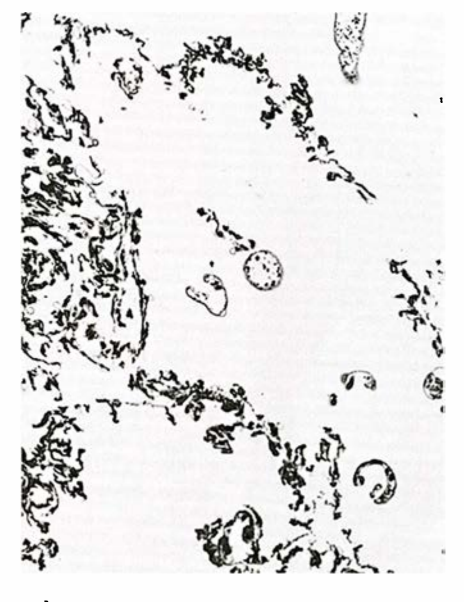
Los fragmentos de las bacterias muertas que sobreexcitan al sistema inmunitario proceden de la pared bacteriana, un exoesqueleto rígido constituido por cadenas de polisacáridos. Sin la pared, el microorganismo reventaría. Tomasz había demostrado que la mayoría de las bacterias, incluido el neumococo, se desintegraban al morir, a través de un proceso fascinante en el que se producía la disolución de dicha pared bacteriana. La penicilina se aprovecha de esa tendencia suicida provocando la lisis, acción ésta en la que intervienen las propias enzimas de la bacteria, encargadas en situaciones normales del acabado y refuerzo de la pared. La penicilina destruye los controles que limitan la actuación de las enzimas, y éstas desgarran y destrozan la pared celular. Transcurrido ya medio siglo desde el descubrimiento de la penicilina, desconocemos todavía los entresijos del fenómenos. Pero disponíamos ahora de un indicio de que la muerte explosiva tiene su lado oscuro que daña al cuerpo, incluso después de haber eliminado la infección.

Nuestro modelo experimental demostró que, cuando las bacterias se multiplican en el líquido cefalorraquídeo, el animal no presenta al principio síntoma alguno. Pero en cuanto la concentración bacteriana alcanza la cifra de 100.000 por mililitro de líquido, se rompe el hechizo. Aparecen desatadas la fiebre y la inflamación, al tiempo que las defensas del organismo provocan súbitamente la liberación de substancias de naturaleza hormonal llamadas citocinas (interleucina-1 y factor de necrosis tumoral). Las citocinas proceden del lado del cerebro de la barrera hematoencefálica y le obligan a ésta a que franquee el paso de los leucocitos. Las bacterias muertas inducen los mismos fenómenos en cuanto suman la concentración de 100.000 por mililitro; en un paciente sin tratar, por tanto, los restos bacterianos, al igual que las bacterias vivas, avivan el ciclo de la inflamación con todas sus consecuencias.

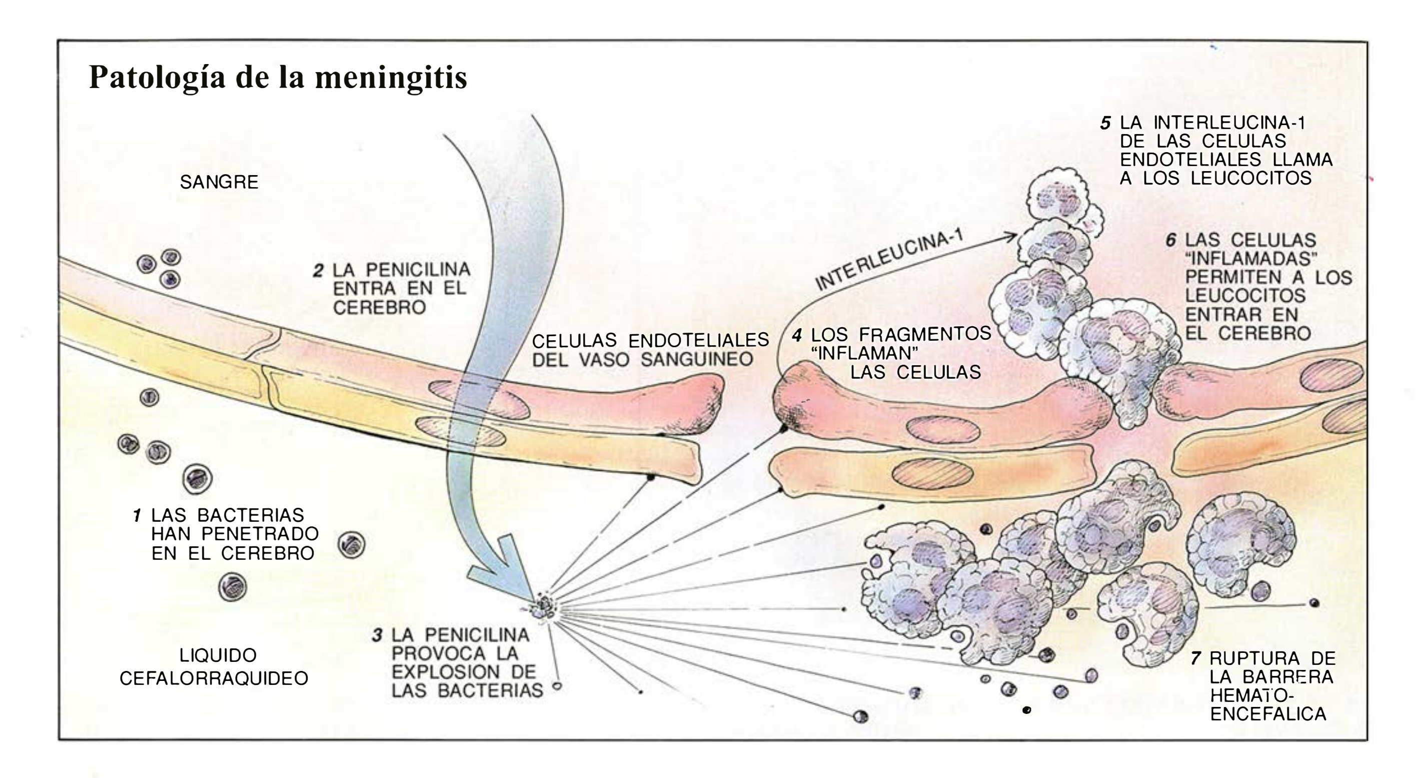
¿Cómo consiguen las bacterias muertas hacer que el organismo se autoinflija semejante daño? ¿No estará el sistema inmunitario confundiendo las bacterias vivas con las muertas? Para salir de dudas, inyectamos en los animales 1000 neumococos vivos e inmediatamente los tratamos con penicilina. Aguardábamos hasta ver si el estallido de las bacterias inducía el paso de los leucocitos que asaltan el cerebro. Transcurridos treinta minutos, el líquido cefalorraquídeo se encontraba, en efecto, plagado de leucocitos.

Poco después de que se realizaran estos experimentos, Martin G. Täuber, Jay H. Tureen y Sande acometieron trabajos parecidos en el Hospital General de San Francisco. Demostraron que no sólo se producía la inflamación del cerebro, sino que también aumentaban la tumefacción y la presión intracraneana hasta niveles peligrosos dentro de las primeras horas después de que se hubiera iniciado el tratamiento con antibióticos. Una inflamación tan violenta resquebraja la arquitectura celular del cerebro y de sus tejidos de sostén.

Confirmábase nuestra sospecha. Cuando una bacteria salta hecha añicos, las defensas del cuerpo toman



3. ESTALLIDOS BACTERIANOS. Enteros, los neumococos poseen una capa capsular vellosa sobre la pared celular (*izquierda*). La penicilina hace que la bacteria destruya sus propias paredes y estalle, dejando el campo del microscopio sembrado de fragmentos procedentes de las paredes celulares.



equivocadamente los fragmentos como si se hubiera producido un estallido de crecimiento bacteriano, ante el que se sienten obligadas a responder. Los añicos de pared bacteriana activan las defensas del organismo y ponen en marcha las alarmas de las citocinas y de los iniciadores de la coagulación. Episodios que sirven para preparar un contrafuerte sobre la pared del vaso sanguíneo; allí se adhieren los leucocitos y se catapultan a través de la barrera hematoencefálica. Alojados ya en el cerebro, los leucocitos estimulan la producción de las alarmas de citocinas, acelerando la rotura de la barrera. Nuevas hornadas de leucocitos van penetrando en el cerebro, exacerbando aún más la inflamación, la tumefacción y la liberación de subproductos tóxicos de la reacción inmunitaria.

En resumen, el modelo animal nos ha enseñado una lección inesperada: el tratamiento antibiótico hace que la meningitis empeore antes de conseguir que mejore. Con información tan sorprendente, los clínicos que trabajan con George H. McCracken, Jr., del Centro Médico del Suroeste de la Universidad de Texas en Dallas, corroboraron idéntico deterioro en niños a los que se aplicaba el tratamiento de la meningitis. Todos los pacientes morirían si no se administraban los antibióticos, pero claramente algunos no sobrevivirían al tratamiento. El resto pierde células nerviosas importantes y muchos quedan con defectos graves que afectan al oído, movimiento o aprendizaje.

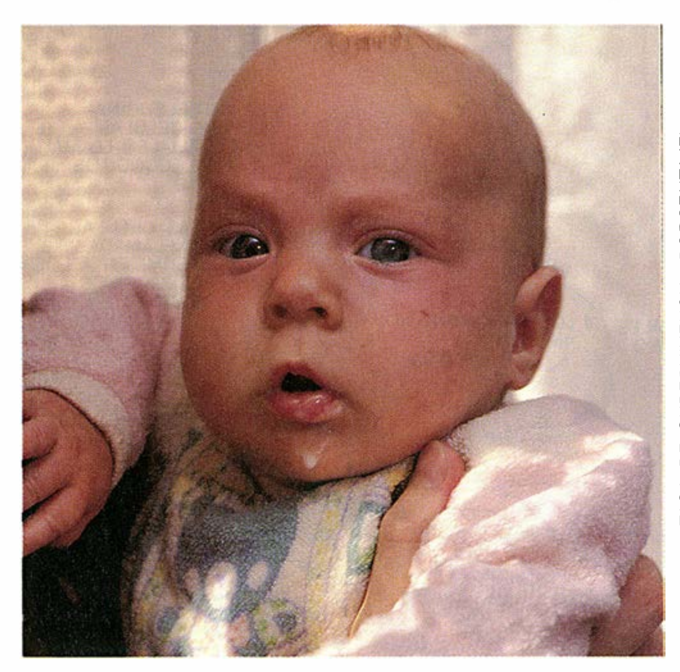
Para salvar al paciente de los efectos secundarios del tratamiento, el médico debe encontrar un camino que tranquilice las defensas confundidas del organismo, mientras los antibióticos destruyen las bacterias. Para determinar qué sistemas defensivos deben suprimirse y cuáles no, es preciso conocer todos los pasos que se suceden en la génesis de la enfermedad. Aunque se está avanzando en esa dirección, gracias a los esfuerzos del Grupo de Estudios Cooperativos sobre la Meningitis, habrá que aguardar años antes de disponer de resultados seguros.

El fármaco antiinflamatorio más potente, el esteroide dexametasona, elimina casi por completo el proceso inflamatorio. Pensábamos, por tanto, que con él se evitaría casi con plena seguridad que las defensas del organismo se desbocaran durante las primeras horas críticas del tratamiento con antibióticos. Sin embargo, aunque la experiencia clínica de años había demostrado la eficacia de ese fármaco en situaciones de inflamación, como la artritis, los resultados no eran tan claros en situaciones de infección. Más aún, algunos médicos seguían resistiéndose a la idea de congelar las defensas del organismo precisamente en la acmé de la infección. Por tales motivos, nos vimos obligados a probar el fármaco en el modelo experimental antes de hacerlo en el niño.

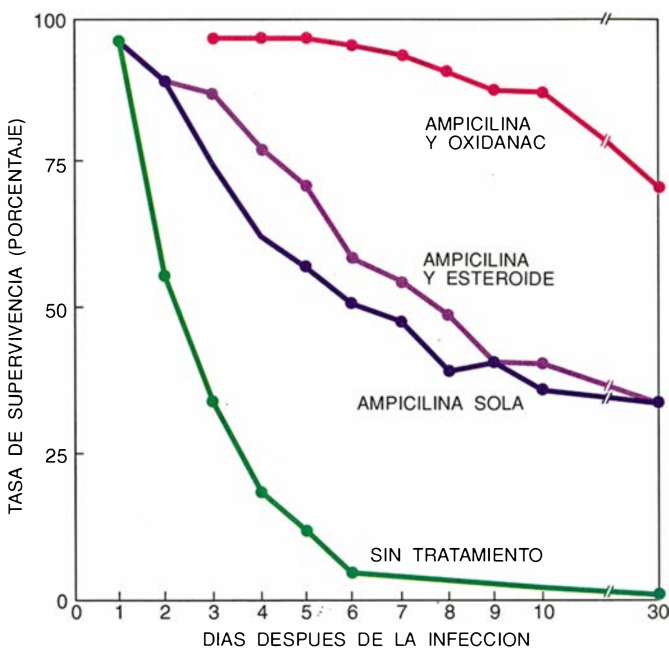
Elegimos para la prueba esteroides y agentes antiinflamatorios no esteroideos, de similar potencia y mayor selectividad. Para nuestra fortuna, se obtuvo una respuesta rápida y decisiva. En colaboración con Oto Zak, del laboratorios de investigación de Ciba-Geigy, demostramos que la administración de ambos tipos de fármacos antiinflamatorios no sólo bloqueaba la respuesta inflamatoria secundaria a la muerte bacteriana, sino que favorecía también la tasa de supervivencia de los animales. Con algunos de los tratamientos no esteroideos, la mortalidad desapareció casi por completo.

Por desgracia, la FDA ("Food and Drug Administration", ente público norteamericano que entiende de alimentación y medicamentos) no ha aprobado todavía el uso de fármacos antiinflamatorios no esteroideos (como el oxindanac) en las enfermedes infecciosas de los niños. Se podría, sin embargo, utilizar los esteroides. En 1987, el grupo de McCraken en Dallas comenzó a ensayar con mezclas de esteroides y antibióticos. Los esteroides rebajaron la incidencia de la pérdida de oído de un 15 a un 3 por ciento, y acortaron el curso de la fiebre de 5 a 1,6 días. Estos resultados, recibidos al principio con escepticismo, se han visto confirmados en muchos centros de todo el mundo, y ahora se reconoce ya que los conceptos obtenidos con el modelo experimental tienen plena validez para el paciente.

En 1990, la Academia Norteameri-



4. EL TRATAMIENTO EN DOS PASOS, original de la autora, congela el sistema inmunitario, y después destruye las bacterias. Este niño se recuperó por completo. La mortalidad media ha descendido de un 30 a menos de un 5 por ciento.



5. UNA MORTALIDAD INCLUSO MENOR debería conseguirse tan pronto como se aprueben los agentes inflamatorios no esteroideos para su uso en niños. El modelo animal muestra unos resultados excelente con el oxindanac.

cana de Pediatría adoptó el uso de esteroides junto con los antibióticos como tratamiento recomendado para la meningitis de la infancia. W. Michael Scheld y sus colaboradores, de la Universidad de Virginia, llevan ahora entre manos demostrar el beneficio de los esteroides en la meningitis en un ensayo con pacientes adultos. Pero los esteroides tienen efectos colaterales serios, la hemorragia gastrointestinal por ejemplo, hemorragia que podría ser grave en el niño ya debilitado por la infección. En mi opinión, otros tratamientos podrían obtener mejores resultados.

El problema básico gira en torno al modo tan drástico con el que la mayoría de los antibióticos destruyen las bacterias. Si éstas no se deshiciesen, el problema no existiría. Sería ideal, pues, disponer de un verdugo más refinado. Una nueva familia de antibióticos derivados de la penicilina, concretamente la familia penem, se acerca bastante a ese arquetipo. Aunque tales antibióticos rompan también la pared bacteriana, los fragmentos son menos nocivos que los que se originan por acción de la penicilina.

Otra estrategia consiste en neutralizar los fragmentos de la pared celular. La vía más segura y específica para lograrlo consiste en recurrir a anticuerpos hechos a medida para neutralizar los fragmentos. Esta neutralización deberá evitar que las defensas del organismo reconozcan los fragmentos como cuerpos extraños. Pero de nuevo volvemos a encontrarnos aquí con el problema de la barrera hematoencefálica, que nos impide el paso de los antibióticos.

Si lo que queremos es introducir los anticuerpos en el cerebro, hemos de hallar la forma de abrir la barrera. Pero la apertura de la barrera alteraría las neuronas, que habitan en un medio completamente diferente al del suero sanguíneo. Esta alteración podría contribuir al daño que se observa en la meningitis. ¿No sería mejor, entonces, encontrar un anticuerpo que la entrada de los leucocitos en el cerebro?

Para conseguir ese propósito, usé un anticuerpo, el anti-CD18, que evita la adherencia de los leucocitos a la pared del vaso sanguíneo. El tratamiento impediría que, durante unas horas, las células cruzaran la barrera y se introdujeran en los tejidos cerebrales, ganando así el tiempo suficiente para que los fuegos artificiales que acompañan la muerte bacteriana remitieran. Al objeto de comprobar la validez de esta hipótesis, inyecté anti-CD18 en el animal de experimentación y le administré después la penicilina.

Lo que sucedió en las horas siguientes es algo que ha quedado grabado en mi memoria. Los animales infectados que habían recibido el anticuerpo junto con los antibióticos se recuperaron en seguida y reanudaron su actividad normal como si no hubieran estado enfermos: la tasa de supervivencia fue del 100 por ciento. El beneficio que se derivaba de evitar que los leucocitos rompieran la barrera hematoencefálica fue enorme. Está previsto que dentro de unos meses podamos disponer de este anticuerpo para ensayos clínicos en humanos.

La meningitis se encuentra acorralada, aunque no pueda decirse que esté vencida para siempre. Para conseguirlo, habría que descomponer el curso de la meningitis en una secuencia de acontecimientos y acotar los que encierran un peligro real, para proyectar en consecuencia las armas específicas contra cada uno. Sabemos que las piezas bioactivas que estallan de la irrupción bacteriana, principalmente las procedentes de la pared, llevan encriptada la información necesaria para provocar todos los síntomas y signos de la enfermedad. La hipótesis de que cada fragmento interviene en la aparición de uno o de varios síntomas entra, pues, en nuestro horizonte. Al tener cada especie bacteriana su propia estructura de pared y un conjunto propio de enzimas para romperla, las infecciones bacterianas diferirán de una manera previsible. Es preciso estudiar la maquinaria que utiliza cada especie bacteriana para la formación de la pared.

Nos hemos servido de cierta técnica desarrollada en Alemania para definir los subcomponentes de las paredes que alojan en su seno los pricipales gérmenes patógenos para

el hombre. La pared de cada invasor contiene una veintena de piezas de éstas, objeto hoy de investigación por parte de nuestro laboratorio y de otros; se ha corroborado ya lo presumido: a piezas distintas corresponden funciones biológicas diferentes.

Esta regla se confirma en infecciones que afectan a otras partes del organismo. Según hemos puesto de manifiesto, las piezas de la pared producen inflamación en el pulmón y en el oído. Raoul S. Rosenthal, de la facultad de medicina de la Universidad de Indiana, y William E. Goldman, de la Universidad de Washington, han demostrado que determinado fragmento, presente en muchas paredes bacterianas, provoca artritis y destruye las células que tapizan las vías respiratorias. James M. Krueger, del centro de ciencias de la salud de la Universidad de Tennessee, atribuye a otro el ser pieza inductora del sueño y probablemente responsable del coma que se observa en las fases avanzadas de la infección; no resultaría nada extraño que la investigación acabara demostrando el aprovechamiento de la misma, administrada en dosis pequeñas, como inocuo somnífero.

Nuestros descubrimientos acerca de los efectos de las piezas de la pared celular sobre muchas funciones del organismo nos han llevado a colaborar con la firma Alkermes, Inc., de Cambridge, en los Estados Unidos, en un empeño por convertir nuestras tablas en un relato de espionaje. Se trata, nada menos, de identificar las artes del invasor para explotarlas en provecho nuestro. Dejando suelta la imaginación, supongamos que del cuerpo muerto del neumococo sacamos algún que otro fármaco: ¿qué cornucopia no podríamos encontrar en otras especies bacterianas?

Pero no es fantasía. Yo misma he descubierto una posibilidad interesante con *Bordetella pertussis*, agente de la tos ferina. Engaña al cuerpo produciendo señales químicas que bloquean la capacidad de vigilancia de los leucocitos para reconocer y dirigirse a sus puntos de destino. Los médicos podrían hacer uso del componente bioactivo de esta bacteria, para diseñar un agente antiinflamatorio de gran selectividad con el que remediar inflamaciones del cerebro, articulaciones, ojos y otras zonas del organismo, en las que el tejido que las rodea debe quedar protegido tanto del sistema inmunitario como de los invasores.

La reflexión en torno a estas ideas nos llevó a buscar el objetivo más atractivo de todos: identificar la señal bacteriana que permite al organismo abrirse paso a través de la barrera hematoencefálica y producir la enfermedad. Thomasz y yo andamos tras la clave para abrir la barrera hematoencefálica. Empezamos por trocear la pared bacteriana del neumococo con las mismas enzimas que la bacteria utiliza para su lisis. Después pasamos las piezas a través de un cromatógrafo líquido de alta presión, que las separa de acuerdo con su composición química. Inyectamos luego tales fragmentos en conejos distintos. Comprobamos, por último, si se han abierto algunas de las compuertas que dan al cerebro inyectando al animal moléculas trazadoras, que de por sí no penetran en el cerebro. Si el marcador se encuentra en el órgano, sabemos que ha penetrado a través de una de esas puertas. Hemos encontrado ya un posible candidato: un glicopéptido, una proteína unida a un azúcar. Esta molécula podría convertirse en una de las llaves que abrieran la barrera hematoencefálica. Seguimos buscando otras.

La selección natural ha dotado a la célula bacteriana de muchas contraseñas; cada una de estas palabras de paso pone en marcha algún proceso normal en el hombre, y quizás en ellas se encierre una inmensa rebotica. En este último sentido, podríamos comparar la pared bacteriana con las toxinas naturales de plantas y animales, como, por ejemplo, el curare, que la medicina aprovecha en beneficio de la humanidad. Hemos aprendido a controlar el tumulto de las defensas del organismo que con su muerte provocan las bacterias. Los agitadores sospechosos están sometidos a un intenso interrogatorio. El espía silencioso que se infiltra en las defensas del cerebro no puede seguir esquivándonos durante mucho tiempo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

PARTNER DRUGS: A NEW OUTLOOK FOR BACTERIAL MENINGITIS. E. Tuomanen en *Annals of Internal Medicine*, vol. 109, n.º 9, págs. 690-692; 1 de noviembre de 1988.

MOLECULAR PATHOPHYSIOLOGY OF BACTERIAL MENINGITIS: CURRENT CONCEPTS AND THERAPEUTIC IMPLICATIONS. X. Sáez-Llorens, O. Ramilo, M. M. Mustafa, J. Mertsola y G. H. McCracken, Jr., en *Journal of Pediatrics*, vol. 116, n.º 5, págs. 671-684; mayo, 1990.

BACTERIAL MENINGITIS: PATHOGENESIS, PATHOPHYSIOLOGY AND PROGRESS. V. Quagliarello y W. M. Scheld en *New England Journal of Medicine*, vol. 327, págs. 864-872; 17 de septiembre de 1992.

La computadora mecánica de Charles Babbage

La construcción, coronada con éxito, de uno de los ingenios calculadores de Babbage, un artilugio de tres toneladas, hace pensar que la historia ha juzgado erróneamente al precursor de la computación automática

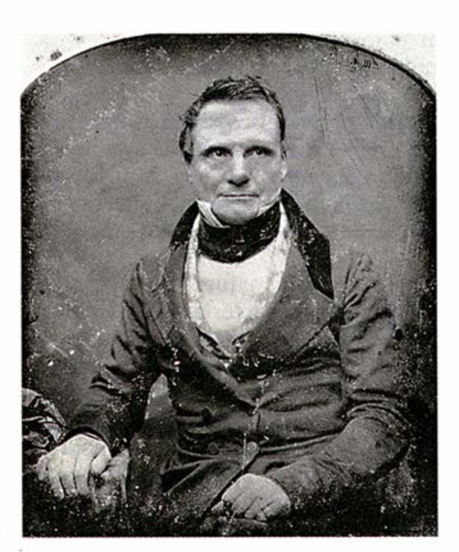
Doron D. Swade

Charles Babbage es tenido por el gran precursor de las ciencias de cómputo. Babbage, empero, no tuvo éxito en sus esfuerzos por materializar sus proyectos. Las historias de la computación afirman indefectiblemente que los tropiezos de Babbage se debieron a que sus artilugios exigían más de lo que la ingeniería mecánica de la era victoriana podía permitir. Resulta curioso, sin embargo, que ninguna prueba respalde tal juicio.

En el Museo de la Ciencia londinense, mis colegas y yo nos propusimos arrojar algo de luz sobre la cuestión. Para ello, pensamos en construir a escala natural uno de los ingenios de cómputo de Babbage, basándonos en los diseños originales. Era el año 1985. Nuestra empresa culminaría con éxito en noviembre de 1991, sólo un mes antes de cumplirse el bicentenario del nacimiento de Babbage. En esa fecha, el dispositivo, conocido por el nombre de Ingenio de diferencias n.º 2, ejecutó impecablemente su primer cómputo de importancia. El éxito de nuestra labor puso de manifiesto que los fracasos de Babbage no se debieron al diseño, sino a una deficiente ejecución práctica.

El ansia de Babbage por mecanizar los cálculos nació de la exasperación que le provocaban las inexactitudes de las tablas matemáticas impresas. Científicos, banqueros, actuarios, navegantes y similares se valían de dichas tablas para realizar aquellos cálculos que exigieran exactitudes mayores que dos o tres cifras. Pero la producción de tablas era penosa y propensa a errores en cada una de las fases de su preparación, desde el cálculo hasta la transcripción y la composición tipográfica. Dyonisius Lardner, divulgador científico de la época, escribió en 1834 que una selección de 40 volúmenes de tablas matemáticas efectuada al azar contenía 3700 correcciones de erratas, algunas de las cuales, a su vez, contenían errores.

DORON D. SWADE es ingeniero electrónico, historiador de la computación y conservador jefe de la sección de computación y control del Museo de la Ciencia de Londres. Dirigió la reconstrucción de la calculadora de Babbage.



1. CHARLES BABBAGE posó para este daguerrotipo hacia 1847, año en que comenzó a trabajar en el Ingenio de diferencias n.º 2

Babbage era un tenaz analista de los errores tabulares. En cierta ocasión colaboró con el astrónomo John Herschel en la verificación de dos conjuntos de cálculos para tablas astronómicas, preparados por separado; ambos científicos quedaron desalentados ante la multitud de discrepancias. "¡Desearía, en el nombre de Dios, que estos cálculos hubieran sido ejecutados por una máquina de vapor!", exclamó Babbage en 1821.

Babbage consideró que las calculadoras mecánicas ofrecerían un medio para eliminar todas las fuentes de errores en las tablas matemáticas. Imaginaba una máquina que no sólo calculase impecablemente, sino que fuese también capaz de erradicar los errores de transcripción y composición tipográfica.

Construyó en 1822 un modelo experimental que sirviera para encaminarle hacia su objetivo. Bautizó a su calculadora "ingenio de diferencias" porque está basada en un principio matemático conocido por método de diferencias finitas, que permite determinar valores sucesivos de funciones polinómicas utilizando únicamente la operación de adición. La multiplicación y la división, mucho más difíciles de traducir a procesos mecánicos, no son necesarias. Dado que el valor de la función en cada paso se calcula a partir del valor precedente, si el resultado final es correcto podemos tener gran confianza en que todos los valores lo son.

Los ingenios de diferencias de Babbage se valen del sistema de numeración decimal. Cada una de las cifras de un número polidígito es representada en una rueda dentada, la rueda de dígitos, que lleva grabados los dígitos decimales. El valor de cada dígito está representado por la rotación angular de la rueda asociada. El mecanismo de control del ingenio garantiza que sólo sean válidos ciertos giros correspondientes a valores numéricos enteros, representados por posiciones definidas de las ruedas numéricas. Babbage se jactaba de que sus máquinas producirían resultados correctos o se bloquearían, pero jamás darían resultados falsos.

El esfuerzo más ambicioso por

construir un dispositivo de cálculo a plena escala estuvo consagrado al malhadado Ingenio de diferencias n.º 1. Sus empeños se hicieron añicos en 1833, tras diez años dedicados al proyecto, desarrollo y manufactura de componentes, por no hablar de los enormes gastos. El proyecto se vino abajo tras una disputa con su ingeniero jefe, Joseph Clement, sobre el pago por la reubicación del taller mecánico. Desde el exterior al menos, la desavenencia no tuvo un fundamento tecnológico. Una pregunta ha permanecido sin respuesta: las circunstancias que rodearon el hundimiento del proyecto, ¿ocultaban la imposibilidad, técnica o lógica, de los proyectos de Babbage?

El Ingenio de diferencias n.º 1 consiste en un elemento sumador básico, repetido muchas veces en un montaje que materializa el método de diferencias. El tamaño y la complejidad del ingenio son monumentales: el diseño incluye alrededor de unas 25.000 piezas, y la máquina montada y en orden de marcha mediría ocho pies de alta (casi dos metros y medio), siete pies de larga (más de dos metros) y tres pies de profundidad (más de noventa centímetros); pesaría varias toneladas. El proyecto, financiado por el gobierno británico, era también costosísimo. Cuando le fue abonada a Clement la última factura, en 1834, la inversión montaba ya a 17.470 libras. Por mor de comparación: la locomotora de vapor John Bull, construida en 1831, costó en total 784 libras.

Clement llegó a dejar listas unas 12.000 de las 25.000 piezas necesarias para el Ingenio de diferencias n.º 1, casi todas las cuales serían posteriormente achatarradas y fundidas. El gobierno acabó retirándose definitivamente del proyecto en 1842, en parte a causa de la opinión de George Biddell Airy, astrónomo real, quien declaró que el ingenio "carecía de valor". El fracaso de no poder terminar el ingenio de diferencias constituyó el trauma fundamental de la vida científica de Babbage.

Los años de trabajo en el Ingenio de diferencias n.º 1 sí produjeron un resultado tangible y notable. En 1832, Clement ensambló una pequeña porción del ingenio, compuesta por unas 2000 piezas, que debía servir como pieza de exhibición. Esta porción terminada del artilugio constituye uno de los más excelentes ejemplos de la ingeniería mecánica de precisión de aquella época, y sigue funcionando a la perfección en el día de hoy.

La pieza de exhibición constituye la primera calculadora automática conocida. A diferencia de las calculadoras de sobremesa de aquel entonces, el aparato, una vez preparado, no requería la intervención de un entendido. Quien la manejase, podía conseguir resultados exactos sin comprender para nada los principios lógicos o mecánicos utilizados.

A pesar de su impresionante capacidad, el ingenio de diferencias sólo podía realizar una tarea fija. La reputación de Babbage como adelantado de la informática descansa en otro dispositivo, mucho más refinado, el Ingenio analítico, concebido en 1834. Pretendía que el Ingenio analítico fuese una máquina computadora universal y programable, de rasgos sorprendentemente parecidos a los ordenadores electrónicos modernos. Disponía de un repertorio de operaciones básicas (adición, sustracción,



2. EL INGENIO DE DIFERENCIAS N.º 2 se construyó cara al público en el Museo de la Ciencia de Londres. Vemos a los dos ingenieros constructores, Barrie Holloway (*izquierda*) y Reg Crick (*derecha*), efectuando ajustes. Babbage proyectó además un mecanismo de impresión para el ingenio de diferencias, no construido todavía por falta de tiempo y presupuesto.

multiplicación y división) que podía ejecutar en secuencia arbitrariamente dada. La arquitectura interna de la máquina presentaba un "almacén" y un "molino" independientes, equivalentes a la memoria y al procesador de un ordenador moderno. La separación de almacén y molino ha sido un factor predominante en el diseño de las computadoras modernas desde mediados del decenio de 1940.

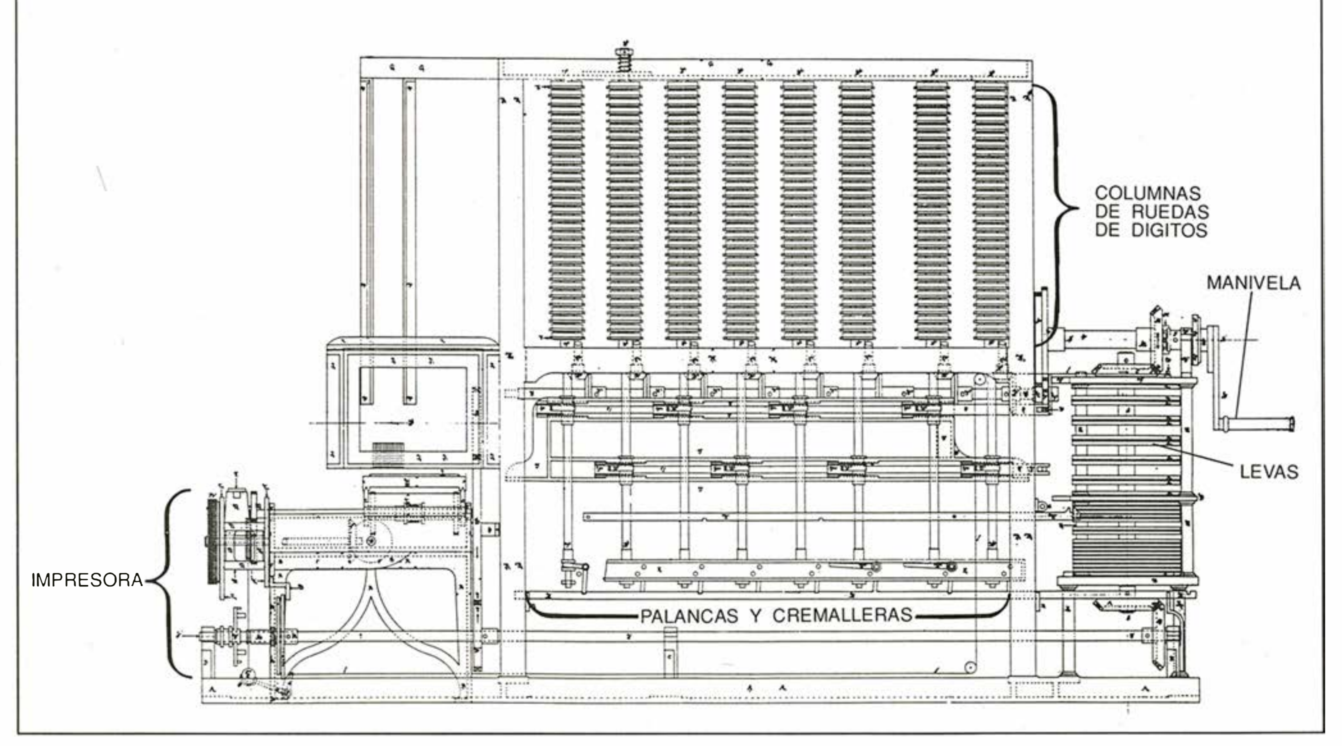
El Ingenio analítico se programaba mediante tarjetas perforadas, técnica utilizada con anterioridad en el telar de Jacquard para controlar los motivos de los tejidos de punto. Era capaz de optar entre diversas líneas de actuación según el resultado de un cálculo, lo que le facultaba para ejecutar funciones complejas. Babbage pretendía que la máquina pudiese recibir datos de hasta 50 dígitos y dar resultados de hasta 100 dígitos; la salida podía ser impresa, perforada en cartulina o representada gráficamente.

Aunque los historiadores suelen referirse al Ingenio analítico como si de una máquina tangible se tratara, en realidad consiste en una serie de diseños que no llegaron a construirse y que Babbage fue refinando y perfeccionando en distintos períodos, desde 1834 hasta su fallecimiento en 1871. Desmoralizado por la suerte del Ingenio de diferencias n.º 1, no emprendió ninguna tentativa seria de construcción de un ingenio analítico a plena escala. Los únicos restos interesantes de sus grandiosos diseños son una pequeña parte experimental del molino, todavía incompleta al morir Babbage, y otro fragmento construido posteriormente por su hijo, Henry Prevost Babbage.

Los trabajos en el Ingenio analítico indujeron a Babbage a meditar sobre el diseño de mecanismos capaces de realizar automáticamente la multiplicación y la división, regulados todos ellos por un complejo sistema de control. Las soluciones a esos problemas le animaron a proyectar un ingenio de diferencias más elegante, el Ingenio de diferencias n.º 2. Aunque tal máquina habría de calcular con una precisión de 31 cifras, diez más que las proyectadas por Babbage para el Ingenio de diferencias n.º 1, contendría la tercera parte de piezas que éste. Delineó planos detallados para esta segunda máquina entre 1847 y 1849, que

Funcionamiento de los ingenios de diferencias

Vemos uno de los veinte planos principales del Ingenio de diferencias n.º 2, que Babbage delineó a partir de 1847. La máquina, accionada mediante la manivela de la derecha, provoca, al girar, la rotación de una pila vertical de catorce pares de levas, que determinan la acción y el sincronismo de los ciclos de cálculo. Los números se almacenan en ocho columnas verticales, cada una de las cuales dispone de 31 ruedas portadígitos, que llevan grabados los números de 0 a 9. El menor dígito significativo de cada número es almacenado en la parte baja de la columna; el mayor, en lo más alto. Los valores iniciales necesarios para cada cálculo se introducen desbloqueando las ruedas de dígitos y haciéndolas girar a mano hasta el guarismo adecuado. Por debajo de las ruedas de dígitos se encuentra un sistema de cremalleras y palancas que, accionadas por enlaces con las levas, alzan, bajan y hacen girar los ejes verticales, efectuando de este modo la adición de diferencias. El Ingenio de diferencias n.º 2 no realiza en secuencia la adición de números de derecha a izquierda, sino que, durante la primera mitad del ciclo, suma los valores almacenados en las columnas impares a los registrados en las pares; después, en el segundo semiciclo, se suman las columnas pares a las impares. Tal técnica reduce el tiempo requerido para el cálculo. Una técnica similar, la técnica de bombeo (*pipelining*), es utilizada en los ordenadores electrónicos. El mecanismo de impresión, dibujado a la izquierda, está acoplado a la última columna de ruedas de dígitos, que registran el resultado final del cómputo. Cada vuelta de la manivela produce un nuevo valor de la tabla de diferencias con una precisión de 30 dígitos, y deja automáticamente a la máquina preparada para generar el número siguiente.



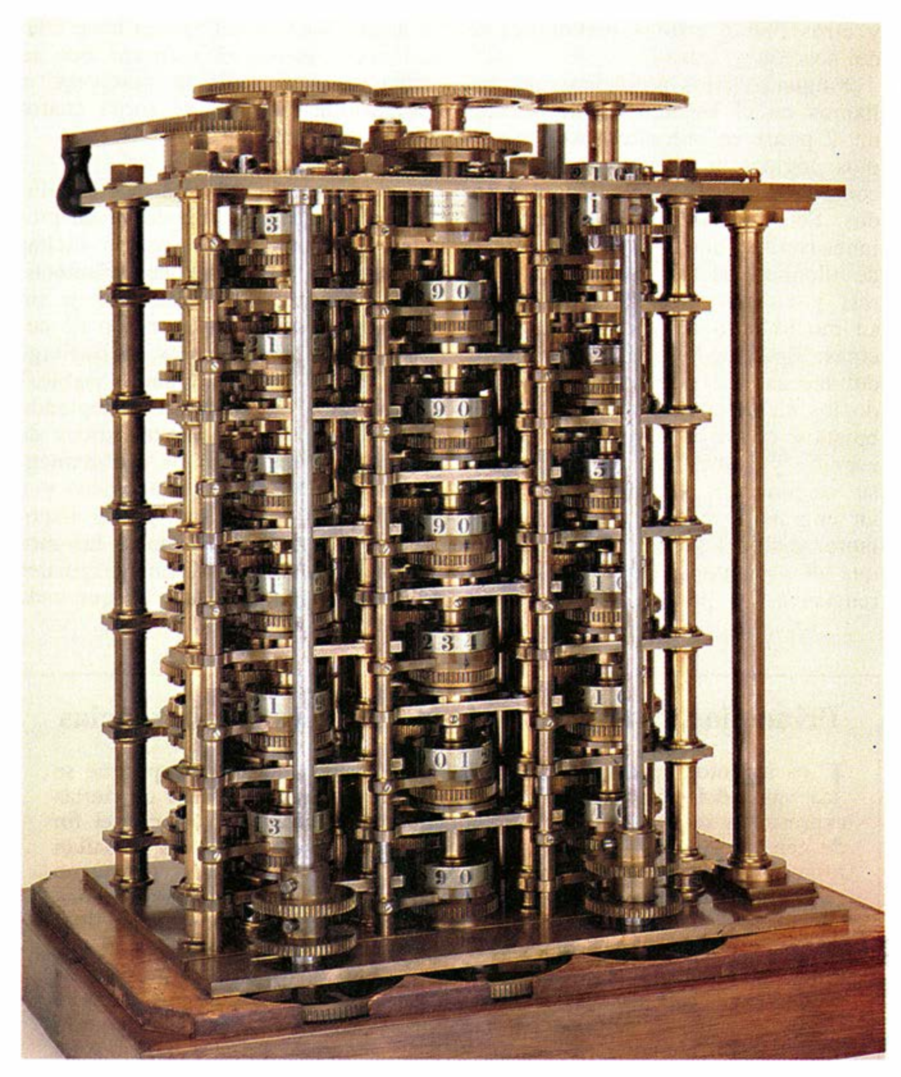
ofreció al gobierno británico en 1852, pero no recibió apoyo alguno. Y así siguieron las cosas durante casi un siglo y medio.

En el curso de diversas visitas a Londres, que comenzaron en 1979, Allan G. Bromley, de la Universidad de Sidney en Australia, examinó los dibujos y cuadernos de Babbage en la Biblioteca del Museo de la Ciencia, y se convenció de que el Ingenio de diferencias n.º 2 era técnicamente realizable.

En 1985, poco después de haber sido yo nombrado conservador de computación del Museo de la Ciencia, se presentó Bromley allí con una propuesta de dos páginas pidiendo que se averiguase la causa del fracaso de Babbage construyendo sus máquinas. Sugería además que el Museo se esforzase en dejar a punto la máquina en 1991, bicentenario del nacimiento de Babbage. La propuesta de Bromley señaló el comienzo de un proyecto de seis años de duración. Los avatares de nuestro empeño por construir el ingenio de diferencias fueron dignos del mismísimo Babbage. Nos embarcamos en un complejo proyecto de ingeniería que nos condujo a terrenos técnicos desconocidos y nos obligó a afrontar rompecabezas mecánicos, crisis financieras y las intrigas inherentes a toda iniciativa de cierto vuelo.

El Ingenio de diferencias n.º 2 era a todas luces el más idóneo para el proyecto. El juego de planos correspondiente se halla intacto, mientras que los planos del Ingenio de diferencias n.º 1 ofrecen lagunas lamentables. Además, el diseño del Ingenio de diferencias n.º 2 es más económico. Las limitaciones financieras y de tiempo pesaban en favor de prescindir de la impresora para concentrarnos en el resto del ingenio. La impresora está compuesta por unas 4000 piezas y constituye por sí misma un problema de ingeniería no poco ambicioso.

La documentación correspondiente al Ingenio de diferencias n.º 2 consiste en 20 planos principales delineados y en varios esbozos. Al estudiar detalladamente los dibujos, descubrí con mis colegas varios errores de concepción en los planos, amén de los detectados por Bromley. Uno de los montajes principales parece ser redundante; faltan en el proyecto, en cambio, otros mecanismos. Por ejemplo, los valores iniciales necesarios para comenzar el cálculo se introducen desbloqueando las columnas y haciendo girar a mano cada una de las ruedas de dígitos recién



3. LA SECCION OPERATIVA del Ingenio de diferencias n.º 1, ensamblada por Joseph Clement en 1832, constituye la primera calculadora automática conocida. Su impecable funcionamiento respalda la convicción que Babbage tenía de que la construcción de un ingenio calculador completo era realizable en la práctica.

liberadas hasta las posiciones apropiadas. Babbage no previó ningún medio para bloquear las columnas ya preparadas, por lo que el procedimiento de puesta en servicio se corrompía por sí mismo.

El fallo de diseño más grave ataña al mecanismo de acarreo, el encargado de "llevar" en las sumas. Este componente crucial tiene la función de hacer que la rueda de dígitos de orden siguiente (cuyos dígitos indican números diez veces mayores) avance una unidad cada vez que la suma parcial en una rueda es mayor o igual que 10. El mecanismo de arrastre sufre su prueba más extrema cuando se le suma 1 a una hilera de nueves. Babbage resolvió el problema del arrastre en forma exquisitamente original. Durante la primera mitad del ciclo de cálculo, el ingenio realiza una suma de 31 dígitos sin arrastrar las unidades de orden superior (los dieces), pero cada rueda digital que pasa de 10 activa un dispositivo de muelles a modo de advertencia. En la segunda parte del ciclo de cálculo, cada uno de los dispositivos activados se encarga de que un brazo giratorio haga avanzar un paso a la rueda digital de orden siguiente.

Pero la configuración del mecanismo de arrastre que muestran los dibujos de Babbage no es viable. El sentido de giro de las ruedas digitales es incorrecto, y el mecanismo de advertencia y arrastre, cual fue delineado, no podría funcionar. El porqué de tales deficiencias ha suscitado considerable especulación. Examinamos la posibilidad de que se hubieran introducido errores deliberadamente como medida de seguridad frente al espionaje industrial. Lo más verosímil es que algunos fallos se debieran a omisiones en el diseño

y otros fueran errores inevitables de delineación y trazado.

Ninguno de los problemas que hallamos en el Ingenio de diferencias n.º 2 ponía en entredicho sus principios lógicos u operativos globales; conseguimos hallar solución para todos. Se suprimieron los mecanismos innecesarios; ideamos los montajes de bloqueo de las ruedas indicadoras, y cuando hizo falta dedujimos su movimiento de los de piezas vecinas. Bromley resolvió el problema del mecanismo de arrastre invirtiendo los elementos incorrectamente dibujados, como si se reflejasen en un espejo, y alterando adecuadamente su orientación. La introducción de un engranaje reductor 4:1 en el eje motor disipó las dudas que había en que el voluminoso Ingenio de diferencias n.º 2 pudiese ser accionado a mano. Esta modificación hace cuatro veces menor el esfuerzo que se requiere para girar la manivela; a cambio, la máquina se torna cuatro veces más lenta.

La traducción práctica de las soluciones halladas planteaba un problema. ¿Podríamos efectuar dichas alteraciones sin desvirtuar la autenticidad histórica del resultado y sin poner en entredicho la misión de demostrar que los ingenios de Babbage eran lógica y prácticamente viables? Resolvimos el problema adoptando métodos de diseño característicos de Babbage y limitándonos estrictamente a los procedimientos técnicos y a los dispositivos de que podía disponer en su tiempo. Además, las modificaciones a los diseños originales se proyectaron de suerte tal que cada mecanismo añadido por nosotros pudiera ser retirado sin dificultad.

En 1989 construimos un montaje experimental en miniatura para verificar la lógica del elemento sumador básico y confirmar que el mecanismo de arrastre operaba bien. El artilugio suma dos números de dos cifras y tiene en cuenta los arrastres de unidades a decenas y de decenas a centenas. El dispositivo, finamente terminado, supuso un gran paso para convencer a patrocinadores y colegas de que nuestro proyecto no sólo comportaba una cuestión histórica sin resolver, sino que, además, constituía una obra de arte ingenieril. El mecanismo experimental resultó más tarde ser de inapreciable ayuda para mostrar el funcionamiento de la máquina y ensayar las primeras muestras de las piezas.

Para la construcción del Ingenio de diferencias n.º 2 y la estimación del costo de fabricación necesitábamos planos a escala natural de todas sus piezas. A finales de 1989 contratamos con una empresa de ingeniería la preparación de un juego de planos a partir de los originales de Babbage. Era preciso suministrar además la información no disponible en los originales: dimensiones detalladas, elección de materiales, tolerancias, métodos de fabricación y otras muchísimas cuestiones de detalle fino.

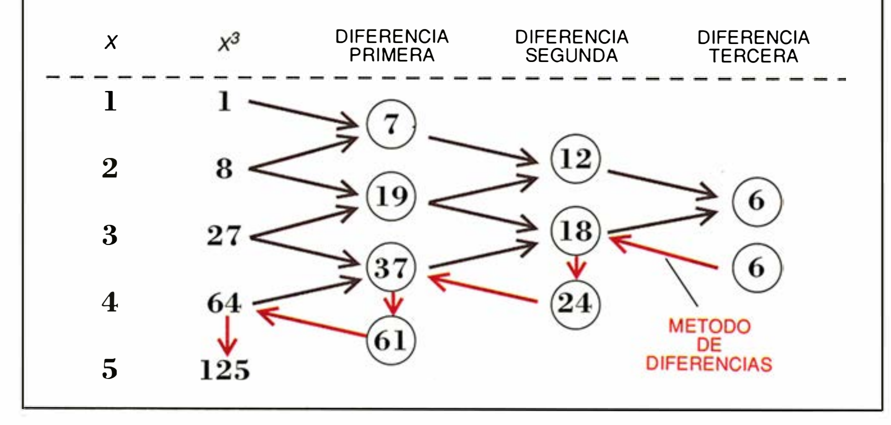
Las dimensiones de las piezas individuales se obtuvieron por medición sobre los planos originales, tras determinar la escala. La empresa de ingeniería produjo 50 nuevos planos que especificaban cada una de las 4000 piezas del ingenio. Los montajes mecánicos que han sobrevivido muestran que Babbage construía sus piezas en bronce, hierro fundido y acero. Bromley y Michael Wright, del Museo de la Ciencia, asesoraron sobre los materiales a utilizar en cada pieza. Nuestros colegas del Colegio Imperial de Ciencia y Tecnología analizaron la composición de los elementos del Ingenio de diferencias n.º 1, a fin de servirnos de guía en la selección de bronces modernos que fuesen adecuados.

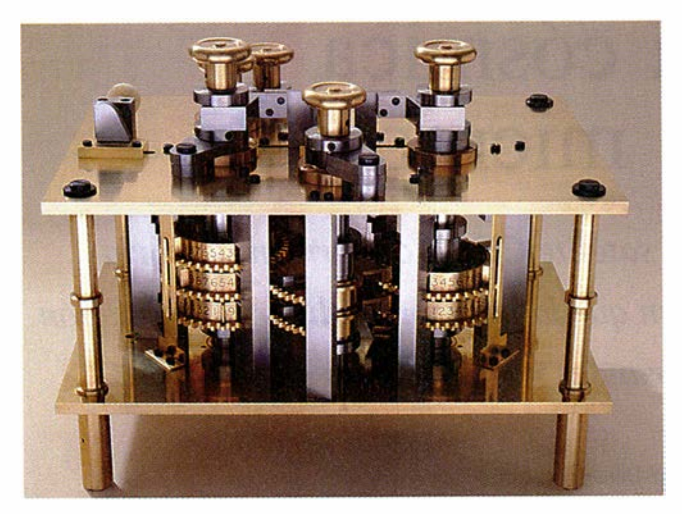
No se hizo ningún intento de utilizar maquinaria de época para la construcción de las piezas. Los 4000 componentes del ingenio suponen sólo unos mil tipos de piezas diferentes, por lo que existe un elevado índice de repetición. Nos servimos sin pudor de las técnicas de manufactura modernas en la producción de las numerosas piezas idénticas. Asimismo, soldamos piezas que Babbage hubiera tenido que forjar. Pero

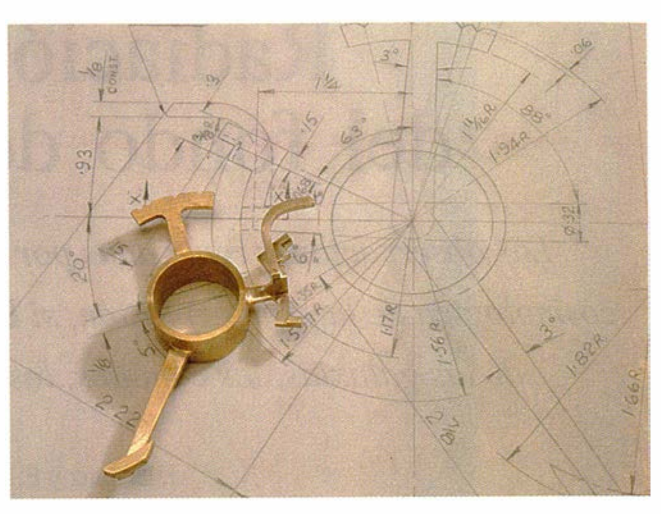
Principios matemáticos de los ingenios de diferencias

Los ingenios de diferencias de Babbage reciben tal nombre porque se valen del método de diferencias finitas para hallar el valor de ciertas expresiones matemáticas. Tal método ha sido utilizado al pie con el fin de generar la tabla de cubos ($y = x^3$). Las diferencias primeras se hallan restando los sucesivos pares de cubos. Se aplica después el mismo procedimiento a los pares de diferencias primeras, con lo que se obtienen las diferencias segundas. Repetido una vez más el proceso con las diferencias segundas, resulta que las diferencias terceras son constantes e iguales a 6. Esta información permite generar, invirtiendo el proceso de generación de las diferencias, el resto de la tabla de cubos. Por ejemplo, al sumar 6 a la diferencia segunda (18) se obtiene la nueva diferencia segunda (24); sumada esta cantidad a la diferencia primera (37) resulta la nueva diferencia primera (61); por fin, sumada ésta al último cubo calculado (64), se obtiene el número siguiente de la serie de cubos, a saber, $125 = 5^3$. El procedimiento puede ser repetido indefinidamente y generar así tantos términos como se quiera por mera adición reiterada.

El método de las diferencias finitas es igualmente aplicable a las funciones matemáticas denominadas polinomios, cuya expresión general es $y = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + ... + a_1 x + a_0$. La diferencia n-ésima de un polinomio de grado n será siempre una constante, la cual sirve de base para el cálculo de valores por el método de diferencias. Son muchas las relaciones de la física y la ingeniería representadas mediante polinomios, que sirven además para aproximar funciones más complicadas, como las funciones trigonométricas y logarítmicas. En los ingenios de diferencias de Babbage, cada columna de ruedas de dígitos representa la posición de un número polidígito de la tabla. El Ingenio de diferencias n.º 2 es capaz de tabular polinomios de grado 7 con una precisión de 31 dígitos, logro admirable incluso con criterios modernos.







4. PARA LA CONSTRUCCION del Ingenio de diferencias n.º 2 fue preciso resolver ciertos problemas de ingeniería. Los técnicos del Museo de la Ciencia construyeron en 1989 parte del mecanismo de cómputo (*a la izquierda*) con el fin de comprobar el correcto diseño del elemento sumador básico del ingenio. Construyeron asimismo 210 complicadas palancas de bronce (*a la derecha, sobre el plano que detalla su construcción*) necesarias para el mecanismo de acarreo.

nos aseguramos de que él hubiera podido producir componentes de la misma precisión, aunque seguramente por otros medios.

La especificación de la precisión con que habrían de construirse las piezas resultó menos problemática de lo que temíamos al principio. Bromley y Wright habían medido piezas tomadas del Ingenio de diferencias n.º 1; comprobaron que Clement conseguía coincidencias en las piezas repetidas con un margen de 35 a 50 milésimas de milímetro, en contradicción con el habitual prejuicio, según el cual la ingeniería mecánica de mediados del siglo pasado no alcanzaba la precisión suficiente para construir los artilugios de Babbage. Adoptamos la norma de la ingeniería moderna, en la confianza de que no desborda los límites de lo que los artesanos del siglo XIX podían conseguir. El proceso de preparación de los 50 planos mecánicos modernos requirió unos seis meses.

Estábamos decididos a garantizarnos un contrato de construcción y montaje a precio fijo, para no repetir la triste historia de Babbage y echar dinero en un saco sin fondo. El Museo de la Ciencia y la compañía especializada llegaron a un acuerdo; pero en junio de 1990, a punto de firmarse el contrato definitivo, la compañía quebró. A menos que lográsemos concretar los pedidos a nuestros proveedores antes de que terminase la jornada comercial del día siguiente incurriríamos en penalización por demora y tendríamos que embarcarnos en otra ronda de negociaciones, que comprometería nuestra meta de tener concluido el proyecto a tiempo para el bicentenario de Babbage. A mediodía del día 8, Crick y Holloway eran ya empleados del Museo. Nos pasamos ese día suscribiendo frenéticamente pedidos de piezas y esbozando contratos. Cumplimos por minutos.

El Ingenio de diferencias n.º 2 fue construido a la vista del público en el Museo de la Ciencia. Las tareas de ajuste y montaje comenzaron en noviembre de 1990 y quedaron concluidas en mayo del año siguiente. El ingenio se convirtió en la pieza central de la exposición que, dedicada a Babbage, se abrió al público el 27 de junio de 1991. Incluso entonces nos tuvo con el alma en vilo. El Ingenio de diferencias n.º 2, con sus tres toneladas de peso, no había realizado aún ni un solo cómputo completo; se bloqueaba sin cuento. Pusimos a punto técnicas de depuración para localizar la fuente de los bloqueos, y continuamos trabajando en la máquina durante la exposición. En noviembre de 1991, un mes antes de cumplirse el bicentenario del nacimiento de Babbage, la máquina completó por primera vez un cálculo a plena escala. Produjo los 100 primeros valores de la tabla de potencias de 7, y ha funcionado sin el menor fallo desde entonces. El ingenio acabó costando menos de 300.000 libras (unos 50 millones de pesetas)

Los historiadores de la técnica han debatido si las estrictas normas de precisión exigidas por Babbage eran necesarias. Se ha señalado que fueron construidos con buenos resultados ingenios mucho más burdos. Georg y Edvard Scheutz, padre e hijo, inspirados por una descripción del trabajo de Babbage, construyeron tres ingenios de diferencias, de diseño propio en su mayor parte. El primero de los tres, terminado en 1843, tenía un bastidor de madera, y en su construcción utilizaron sencillas herramientas de mano y un torno rudimentario. A pesar de su rudeza, la máquina de los Scheutz funcionó satisfactoriamente ante la Real Academia de Ciencias de Suecia.

Pero los ingenios de diferencias de Babbage eran mayores y más refinados. Nuestra experiencia en la construcción del Ingenio de diferencias n.º 2 subraya la importancia de la adopción de estrictas normas de calidad. Esperábamos que las piezas repetidas, construidas mediante máquinas herramientas computarizadas, serían lo bastante idénticas como para que fuesen intercambiables. Sin embargo, resultó necesario el retoque fino de los componentes hasta las centésimas de milímetro, sobre todo para que el mecanismo de acarreo funcionase. La insistencia de Babbage en piezas de alta precisión se fundaba en sólidos principios de ingeniería.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

GLORY AND FAILURE: THE DIFFERENCE ENGINES OF JOHANN MÜLLER, CHARLES BABBAGE AND GEORG AND EDVARD SCHEUTZ. Michael Lindgren. MIT Press, 1990.

CHARLES BABBAGE AND HIS CALCULATING ENGINES. Doron Swade. Science Museum, Londres, 1991.

A MODERN DIFFERENCE ENGINE: SOFTWARE SIMULATORS FOR CHARLES BABBAGE'S DIFFERENCE ENGINE No. 2. James Donnelly. Armstrong Publishing Company, 1992.

Radiación cósmica del fondo de microondas

Las observaciones realizadas por el satélite COBE confirman la teoría cosmológica de la gran explosión, si bien queda aún por explicar la formación de las galaxias, los cúmulos, los grandes vacíos y otras estructuras

J. L. Sanz y E. Martínez-González

Nadie podía sospechar que con aquel artículo, de título anodino ("Una medida de un exceso de temperatura a 4080 megaciclos por segundo"), A. A. Penzias y R. W. Wilson iban a revolucionar la cosmología. Lo publicaron el mes de mayo de 1965 en *The Astrophysical Journal*. La interpretación de que la temperatura residual de unos tres grados sobre el cero absoluto, y a una longitud de onda de 7,3 centímetros, corresponde a una radiación de fondo que proviene de un pasado muy denso y caliente del universo constituye uno de los pilares sobre los que se asienta el modelo de la gran explosión ("big bang").

Veintisiete años después, G. Smoot, del laboratorio Lawrence de Berkeley, hacía público que los millones de datos obtenidos hasta entonces por el satélite *COBE* ("Explorador del Fondo Cósmico") permitían concluir que existen anisotropías en la radiación de fondo de microondas en el rango de 10^{-5}; o lo que es lo mismo: cuando observamos el cielo en la región de microondas del espectro de la luz con dos antenas que apuntan en sendas direcciones, separadas por un ángulo de unos 10 grados, la temperatura medida por las antenas difiere, en promedio, en una parte en cien mil. Esa observación corrobora que nuestras ideas acerca del origen del universo y de la formación de estructuras mediante la inestabilidad gravitacional no andan muy desencaminadas.

El satélite *COBE* ha suministrado información adicional, que confirma el modelo de la gran explosión: el espectro de la radiación de fondo de microondas (RFM) tiene la misma forma que el de un cuerpo negro —cuerpo ideal que absorbe y emite toda la luz que recibe— a la temperatura de tres grados kelvin, en el intervalo de frecuencias de 30 a 600 gigahertz (1 gigahertz equivale a 10^9 ciclos por segundo; en longitudes de onda, 0,05 a 1 centímetro). Esa temperatura corresponde a la región de microondas. El máximo de emisión se da en la longitud de onda de un milímetro. Tal espectro de radiación representa el flujo de fotones para cada longitud de onda, y entendemos por flujo la energía recibida por unidad de tiempo, unidad de área, unidad de ángulo sólido y unidad de longitud de onda.

En lo que sigue abordaremos las principales observaciones del fondo de microondas con sus implicaciones en el modelo de la gran explosión y las teorías dominantes sobre formación de galaxias y macroestructuras. Estudiaremos también otros tests observacionales y experimentos que tienen que ver con el fondo de radiación o con los modelos.

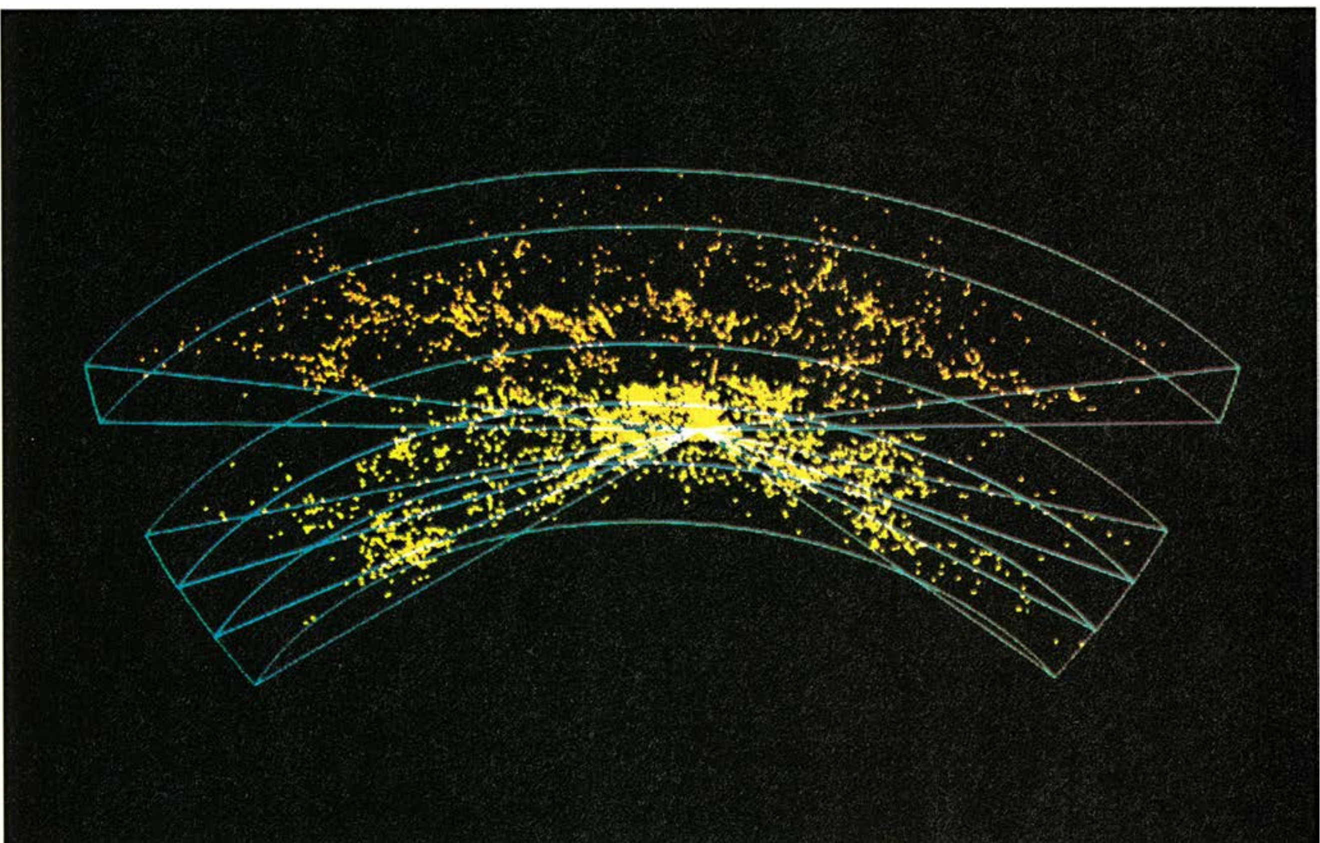
El fondo difuso de fotones, constituido por la luz que no se puede asociar de forma directa a las estrellas, galaxias y otras fuentes discretas, contiene una región de interés cosmológico: la zona de microondas; se extiende ésta desde 0,01 a 100 centímetros en longitudes de onda, donde reside la mayoría de los fotones difusos.

Aunque hay unos 500 fotones por cada centímetro cúbico de microondas, y sólo 0,2 protones por metro cúbico, la densidad de energía de aquéllos es de unos 10^{-34} gramos por centímetro cúbico, es decir, al menos 3 órdenes de magnitud por debajo de la densidad de materia observada en las galaxias, que se cifra, pues, en unos 10^{-31} gramos por centímetro cúbico. De ello se desprende que la influencia dinámica de los fotones es, hoy, despreciable.

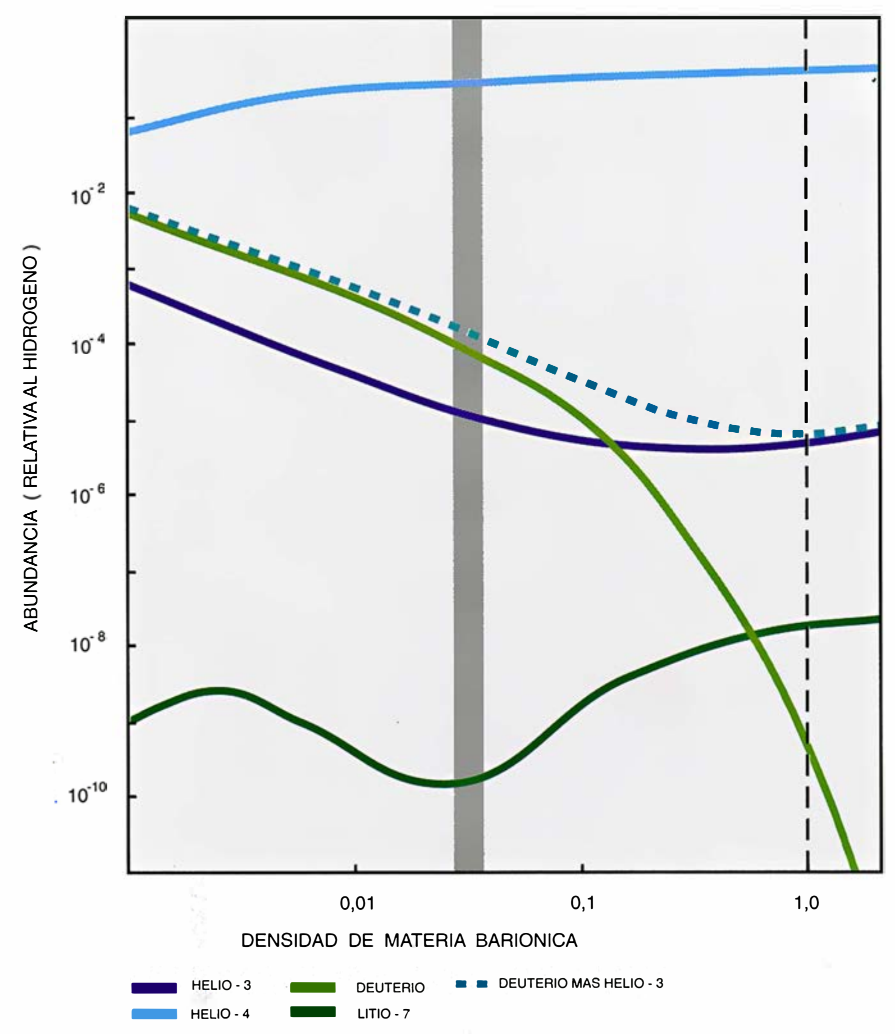
Conviene saber, asimismo, que la radiación de fondo de microondas es luz procedente de un pasado remoto del universo, cuando éste constituía un objeto muy denso y caliente. No está claro, sin embargo, el origen de las demás regiones del fondo difuso: región de rayos gamma (con una longitud de onda inferior a 10^{-10} centímetros), región de rayos X (entre 10^{-10} y 10^{-7} centímetros), región óptica-ultravioleta (entre 10^{-7} y 10^{-4} centímetros), región infrarroja (entre 10^{-4} y 10^{-2} centímetros) y región radio (por encima del metro). De acuerdo con el intervalo de frecuencias, el origen de estas regiones puede deberse a la emisión acumulada de las radiogalaxias, galaxias jóvenes, cúmulos de galaxias, núcleos activos y otras fuentes.

¿Qué pruebas sólidas tenemos que respalden la teoría de la gran explosión? El desarrollo histórico de este modelo cuenta con la aportación teórica de Albert Einstein y Alexander Friedmann. Al primero se deben las ecuaciones de la relatividad general y la introducción de la homogeneidad e isotropía para describir el universo en sus rasgos globales. El segundo aportó las soluciones no-estáticas de las ecuaciones de Einstein que representan la evolución general del universo; de acuerdo con tales soluciones existe un instante de tiempo donde la materia-energía se hace

JOSE LUIS SANZ y ENRIQUE MARTINEZ-GONZALEZ son catedrático de universidad y colaborador científico del CSIC, respectivamente, en la Universidad de Cantabria. Trabajan en equipo, desde hace 6 años, en temas relacionados con la formación de galaxias y el fondo cósmico de microondas. Mantienen una estrecha colaboración con investigadores de la Universidad de Berkeley.



1. MACROESTRUCTURAS DEL UNIVERSO, aparecen en estas cuñas (obtenidas por M. Geller y J. Huchra) que representan la distribución de galaxias alrededor del cúmulo de galaxias de Coma. La cuña separada (*puntos rojos*) cubre declinaciones entre 8º.5 y 14º.5 y las otras tres de 26º.5 a 44º.5. En la figura de arriba (aparecen superpuestas las 4 cuñas) se aprecia el cúmulo de Coma en la zona central, y la "Gran Muralla" (de dimensiones 500 × 200 × 15 millones de años-luz) que cruza más o menos horizontalmente a través de todas las cuñas y grandes "vacíos" de galaxias, el mayor con un diámetro de unos 180 millones de años-luz. En la figura de abajo (aparecen de canto las 4 cuñas) se distingue la "Gran Muralla" en la cuña aislada.



2. SINTESIS DE ELEMENTOS LIGEROS producida en la gran explosión, que depende de la densidad de la materia ordinaria, o bariónica, en ese tiempo. En el eje horizontal se representa la densidad de materia bariónica en unidades de la densidad crítica y en el eje vertical aparece la abundancia relativa al número de núcleos de hidrógeno (en el caso de helio-4 la abundancia es relativa a la masa del hidrógeno). Las curvas representan las abundancias obtenidas proyectando los cálculos de nucleosíntesis primordial y la banda estrecha muestra el intervalo de densidad permitido por la concentración de esos isótopos que se observa en el universo.

muy densa (¡densidad infinita!), que se denomina singularidad de la gran explosión.

La primera prueba en favor de la realidad de ese instante la ofreció Edwin P. Hubble, quien estableció la expansión del universo apoyándose en el corrimiento hacia el rojo que observaba en la mayoría de los espectros de las galaxias motivado por el alejamiento mutuo de éstas. El efecto es similar al que se produce con el pitido de un tren cuando se aleja de la estación: un observador situado en el andén oye el sonido más grave que los pasajeros, ya que la longitud de onda aumenta. Se habla de corrimiento hacia el rojo porque este color se halla en el sentido de las longitudes de onda crecientes. Hubble señaló que la velocidad de recesión de las galaxias es directamente proporcional a la distancia que nos separa de ellas.

La segunda prueba en favor de la gran explosión procede de la nucleosíntesis primordial. George Gamow sugirió que la concentración relativa de diferentes especies químicas se determinó en los primeros instantes de la expansión, cuando la temperatura de la materia primordial era todavía suficientemente alta (unos 10.000 millones de grados kelvin) para permitir el éxito de las reacciones nucleares en la producción de elementos. Esos núcleos atómicos serían esencialmente hidrógeno, helio-4, deuterio, helio-3 y litio-7. Los datos observacionales recientes sobre la concentración de esos elementos en varios objetos astronómicos dan las siguientes proporciones de helio-4 a hidrógeno, por debajo de un 25 por ciento; entre 10^{-5} y 10^{-4}, la razón de la suma de deuterio más helio-3 a hidrógeno; y entre $10^{-9,7}$ y $10^{-8,7}$, la proporción de litio-7 a hidrógeno.

Los cálculos relativos a la nucleosíntesis primordial —cuando el universo tenía entre 1 segundo y unos pocos minutos de edad— permiten ajustar las concentraciones mencionadas, siempre que la densidad bariónica (bariones son el protón y el neutrón, constituyentes básicos de la materia ordinaria) esté acotada entre una décima y una centésima de la densidad crítica. Se cifra la densidad crítica en 2×10^{-29} gramos por centímetro cúbico; se trata de un parámetro que sirve para diferenciar los modelos de expansión ilimitada. (cuando se admite una densidad inferior) de los modelos que introducen una fase de contracción en la evolución del universo (cuando se admite una densidad mayor que la crítica). Pues bien, la concentración de elementos ligeros observada se ajusta a lo predicho por el modelo de la gran explosión.

La tercera prueba fundamental en favor del modelo de la gran explosión proviene de la radiación de fondo de microondas (RFM), el test más potente de cosmología. Este fósil del universo está constituido por fotones que se han propagado —sometidos únicamente a la acción de la gravitación debida al resto de la materia— desde que el universo tenía 300.000 años. A aquella edad, o tiempo de recombinación, el proceso de expansión provocó la caída de la temperatura del universo hasta los 4000 grados kelvin; los fotones dejaron de interaccionar con los electrones, y éstos se agruparon con los núcleos de los elementos ligeros para formar átomos neutros. Por la propia expansión, el universo siguió enfriándose; la RFM llegó a su temperatura actual, de unos 2,73 grados kelvin.

El espectro de la RFM es térmico: tiene la forma de un cuerpo negro. Ese proceso de termalización ocurrió en la gran explosión de manera natural, debido a las condiciones extremas de temperatura que allí se dieron y que determinaron que la materia y la radiación se hallaran en equilibrio térmico. Cualquier desviación respecto al espectro de cuerpo negro corroboraría la existencia de procesos físicos muy energéticos en la historia del universo. Se cree que tales procesos intervinieron en la formación de gran número de estrellas muy masivas en el universo primitivo; éstas explotarían y originarían fuertes emisiones de radiación,

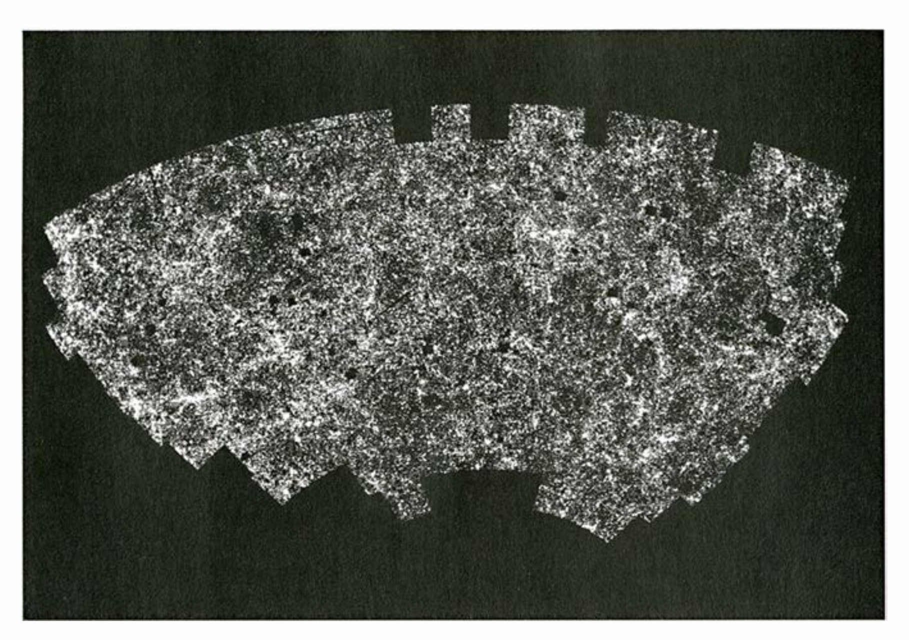
mayores aún que las que conocemos en las explosiones de supernovas. Por otro lado, las fluctuaciones de densidad presentes en el universo primordial —fluctuaciones que, por acción de la inestabilidad gravitatoria, generarán luego estructuras— dejaron su huella impresa en la radiación en forma de anisotropías (variación de la temperatura según la dirección de observación).

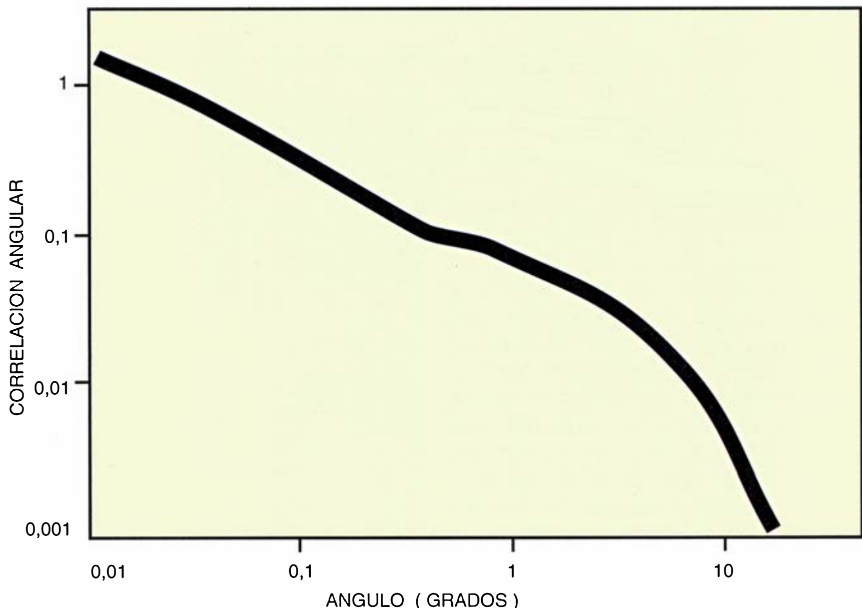
¿Cómo se compagina esa homogeneidad de la temperatura en todas las direcciones que miremos, es decir, esa gran isotropía de la RFM, con la existencia de macroestructuras en el universo? La isotropía observada en muy diferentes escalas angulares (desde unos segundos hasta 180 grados de arco) sugiere que el universo ha sido muy uniforme en su juventud. Pero desde los años ochenta se han venido acumulando pruebas de un universo macroestructurado. Así, el grupo de P. Kirschner descubrió un inmenso "vacío" —de tal se habla cuando la densidad de las galaxias brillantes no llega al 20 % de la densidad media del universo— en la dirección de la constelación del Boyero, a una distancia de unos 900 millones de años-luz y con un diámetro de unos 300 millones de años-luz. Tan gigantesca región, sin apenas galaxias, no parece ser exclusiva de esa dirección; en 1986 se detectó un conjunto de grandes vacíos en torno al cúmulo de galaxias de Coma. La existencia de vacíos se confirma con la investigación de varias cuñas en direcciones adyacentes; parece ser incluso que la distribución de galaxias en las paredes de algunos de ellos definen una "Gran Muralla", suerte de muro de 600 millones de años-luz.

Se perciben, además, extensos filamentos de galaxias que enhebran cúmulos entre sí, como el de Piscis y Perseo, con una longitud de unos 120 millones de años-luz. El grupo de S. Maddox ha obtenido la función de correlación angular para unos dos millones de galaxias, con magnitudes entre 17 y 20,5, en una región del cielo centrada en el polo sur galáctico. (La función de correlación mide, en promedio, el exceso relativo de galaxias en un círculo alrededor de cada galaxia respecto de una distribución uniforme.) El resultado que han conseguido es bastante sorprendente: existe señal en la correlación por encima del 1 % hasta escalas de unos 240 millones de años-luz.

A. Dressler y otros han encontrado que todas las galaxias de nuestro entorno parecen moverse en una dirección que coincide aproximadamente con la definida por el supercúmulo de Hydra-Centauro. A una distancia de unos 300 millones de años-luz podría haber una gran concentración de materia ("el Gran Atractor", de masa 10^{16} veces la solar), que sería la causa de la atracción de todo el entorno incluido el Grupo Local (conjunto de una veintena de galaxias, la nuestra también), el cúmulo de Virgo y el complejo de Hydra-Centauro. Existe una dificultad en la detección de tal concentración, pues la dirección coincide con la del plano galáctico. Dressler parece haber detectado la caída hacia el Gran Atractor de las galaxias que están detrás del mismo. Otros investigadores admiten una concentración de materia aún mayor en la misma dirección, pero mucho más distante: "la concentración de Shapley", a unos 900 millones de años-luz.

La existencia de macroestructuración, que constituye según se ve un hecho real, dilata el problema cosmológico: no basta con descubrir un modelo para explicar la formación de galaxias y cúmulos, sino que





3. MOSAICO DE DISTRIBUCION DE GALAXIAS (*arriba*) creado con las fotografías de los dos millones largos obtenidos, por S. Maddox y colaboradores, en una zona del cielo centrada en el polo sur galáctico. En el gráfico se representa la función de correlación angular, que mide el exceso relativo de agrupamiento de galaxias con respecto a una posible distribución uniforme en cada escala angular. Un valor positivo (negativo) de la correlación en un ángulo concreto significa que existe agrupamiento (antiagrupamiento). Las observaciones corroboran dicha correlación hasta ángulos mayores de 10 grados de arco, que es un resultado inesperado.

debe también dar razón de estructuras con un rango entre 1/2-600 millones de años-luz.

Ahora bien, tan importante es la determinación de la macroestructura del universo como la identificación de la naturaleza de la materia que lo constituye. Se sabe que sólo una fracción muy pequeña de la misma emite luz, por lo que la única información que se tiene del resto viene a través de la interacción gravitatoria. Además, existen indicios de que la naturaleza de la misma puede ser muy distinta de la materia bariónica que conocemos.

¿En qué se funda la tesis según la cual la principal componente del universo es materia no-bariónica? En primer lugar, del estudio de las curvas de rotación de las galaxias espirales se infiere la existencia de un "halo" de materia oscura que rodea la galaxia; si no lo hubiera, la velocidad debería decrecer, en vez de mantenerse constante. En principio, este tipo de materia oscura podría ser bariónica, pero habría entonces que explicar cómo se segrega en dos especies diferentes: una materia emisora de luz y otra que no radia. Además, del estudio de sistemas binarios de galaxias y de cúmulos de galaxias se deduce la necesidad de materia oscura para poder explicar su estado dinámico.

En segundo lugar, para justificar la existencia de materia oscura se apela a la anisotropía del fondo y al crecimiento de las inhomogeneidades o fluctuaciones de densidad. En un universo abierto de baja densidad, mucho menor que la crítica, las fluctuaciones de densidad que hay en el momento en que la materia y la radiación se desacoplan (a los 300.000 años de la gran explosión) se congelan rápidamente, debido a la fuerte expansión del universo y escasa materia global. Por tanto, para crear las galaxias, cúmulos y demás estructuras, ha de haber unos gérmenes en el universo primitivo con amplitud de fluctuaciones mucho más alta que en un universo de mayor densidad. Pero al ser mucho mayores, las fluctuaciones imprimirán en la RFM un sello intenso, hasta el punto de violar los límites superiores de anisotropía. Por todo ello, el universo debe tener un contenido material con densidad cercana a la crítica. Ahora bien, si atendemos al límite superior del contenido bariónico que proporciona la nucleosíntesis primordial, resulta la paradoja inevitable de que la composición básica del universo es de materia cuyas propiedades desconocemos.

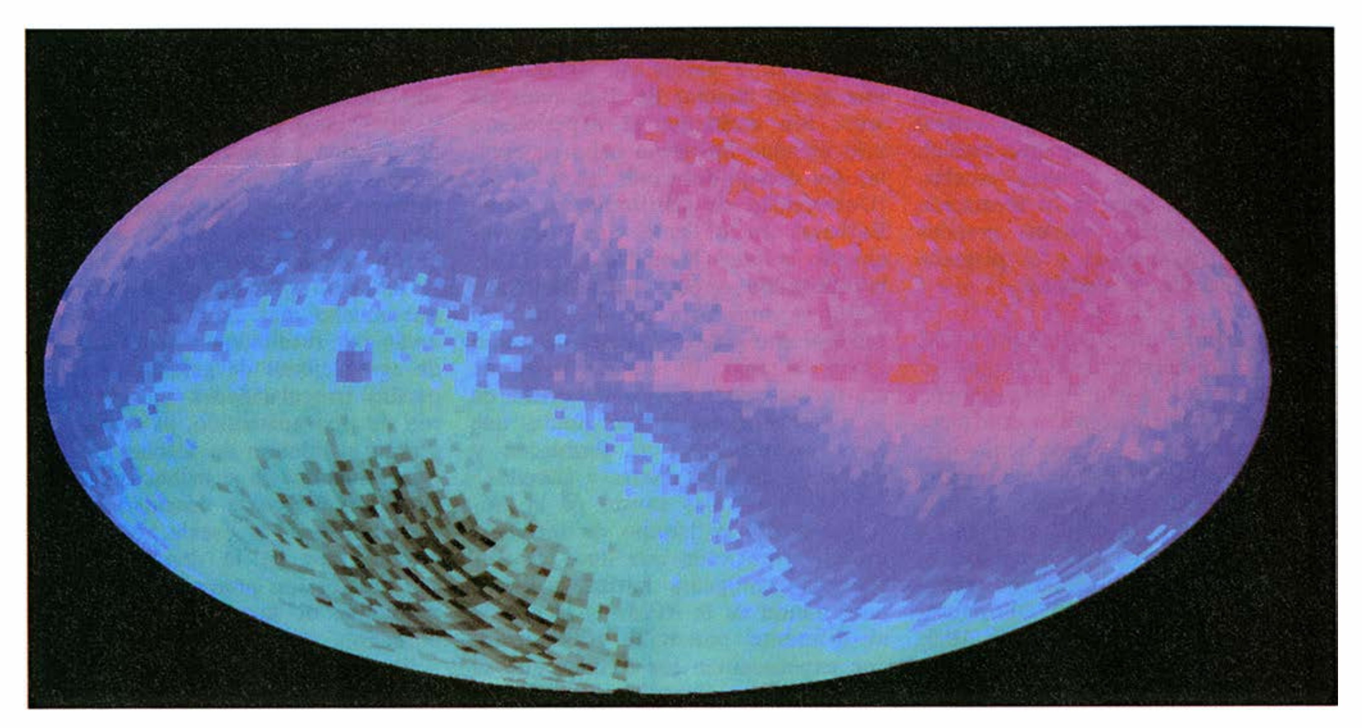
Así las cosas, ¿qué ha descubierto el *COBE*? El satélite, lanzado el 18 de noviembre de 1989, sigue una órbita casi polar con una inclinación de 99 grados con respecto al ecuador, desde una altura de 900 kilómetros. Posee un movimiento de rotación de 0,8 revoluciones por minuto con su eje apuntando en dirección casi perpendicular a la del Sol; va así gradualmente barriendo el cielo a medida que la Tierra se mueve en torno al Sol.

Lleva a bordo tres tipos de instrumentos: DIRBE, FIRAS y DMR. El primero, o experimento de fondo infrarrojo, diseñado para la búsqueda de galaxias primitivas y otros objetos que se formaron poco después de la gran explosión, cubre el rango de longitudes de onda de 1 a 300 micras. FIRAS (espectrofotómetro absoluto del infrarrojo lejano) usa una trompeta cónica para recoger la radiación cósmica de fondo y determinar su espectro, cubre el rango de 0,01 a 1 centímetros y resuelve este intervalo de longitudes de onda en 100 canales; tiene un campo de visión de siete grados y puede, pues, distinguir 1000 regiones independientes del cielo de las que genera un espectro. Por último, DMR (Radiómetro Diferencial de Microondas) consta de 3 instrumentos que operan a 3,3, 5,7 y 9,6 milímetros; cada uno de ellos presenta, a su vez, 2 antenas (receptoras de sendos haces de 7 grados de diámetro), separadas un ángulo de 60 grados y destinadas a la búsqueda de anisotropías en la RFM.

Desde la medición pionera de Penzias y Wilson a 7,3 centímetros hasta 1988, todas las medidas realizadas establecían un espectro de cuerpo negro para la región de Rayleigh-Jeans, de longitud de onda superior al milímetro. Después del lanzamiento del *COBE*, el espectrofotómetro FIRAS obtuvo una medida del espectro en el intervalo de 0,05 a 1 centímetro —con datos de los 9 primeros minutos— que se ajusta a un cuerpo negro con una temperatura de 2,73 grados kelvin. Otro experimento, llevado a cabo en un cohete a finales de 1989 por un grupo canadiense, permite también concluir que el espectro de la RFM es el de un cuerpo negro con una temperatura de 2,736 grados kelvin en el intervalo de 0,28 a 3,3 milímetros. De lo que se infiere un espectro de cuerpo negro en un intervalo muy amplio, que confirma la idea de una gran explosión.

Además, las condiciones en que se desarrolló la gran explosión fueron de extrema uniformidad. Cualquier proceso físico que inyecte energía en la radiación dejará su sello en forma de distorsión del espectro; después de ese tiempo, las interacciones materia-radiación son incapaces de termalizar cualquier perturbación. La inyección de energía en un tiempo posterior a los 10.000 años distorsionaría el espectro. Por otro lado, la

4. ESPECTRO generado con datos relativos a 9 minutos de observaciones con el espectrofotómetro absoluto del infrarrojo lejano, instalado a bordo del *COBE*. Los datos se ajustan perfectamente a un espectro de cuerpo negro con una temperatura de 2,735 ± 0,06 grados kelvin. El flujo se da en unidades de 10^{-9} ergs partido por metro cuadrado y por segundo, en tanto que la frecuencia se da en inverso de centímetros. La longitud de onda es el inverso de la frecuencia en esas unidades.



5. MAPA DEL CIELO obtenido con el radiómetro del *COBE* que opera a 53 gigahertz y una longitud de onda 5,7 milímetros. Se observa una amplia zona más caliente que el valor medio en la parte superior derecha y una zona más fría en la parte inferior izquierda; esta forma es típica de una componente dipolar. El dipolo genera una anisotropía en el nivel de la milésima; es decir, cuando se observa la radiación en dos direcciones opuestas 180 grados, la temperatura difiere en 1 parte en mil. Esta anisotropía no es de origen cosmológico, sino que obedece al movimiento de la Tierra con respecto al baño de radiación, con una velocidad de unos 300 kilómetros por segundo en dirección a la constelación de Leo.

emisión de radiación por el polvo generado en el proceso de formación de estructuras y calentado por fuentes energéticas modificaría el espectro de la RFM especialmente en la región submilimétrica.

D. Bond y colaboradores concluyen que la mayoría de los modelos que contienen polvo en los que la energía radiativa es mayor que cierto valor, cifrado en cuatro millonésimas de la densidad crítica, quedan descartados y aquellos que sobreviven serán eliminados —o confirmados— con el próximo perfeccionamiento del espectro de aproximadamente un orden de magnitud. En otro sentido parece claro que el fondo duro de rayos X, entre 3 y 100 kiloelectronvolts, no puede proceder de una radiación de frenado ("bremstrahlung") en un medio intergaláctico uniforme y caliente.

Pasemos ahora revista a las observaciones de anisotropías en la RFM. ¿Se mueve la Tierra con respecto a la radiación de fondo? Doce años después del descubrimiento de la RFM por Penzias y Wilson, se produjo la primera detección inequívoca de anisotropía en gran escala angular por G. Smoot, M. Gorenstein y R. Muller. Se esperaba anisotropía al nivel de una parte en mil o en diez mil, por efecto Doppler provocado por el movimiento de la Tierra con respecto al baño de radiación. De hecho, el experimento de 33 gigahertz, 9 milímetros, se llevó a cabo con una doble antena que medía la temperatura entre dos regiones separadas 60 grados de arco, y obtuvo una variación angular de tipo dipolar. Esta variación dipolar corresponde a un movimiento de la Tierra respecto a la RFM de velocidad 390 ± 60 kilómetros por segundo en la dirección de la constelación de Leo.

¿Queda algún rastro de las inhomogeneidades primitivas precursoras de la macroestructura? La información emitida por la gran explosión inicial no se ha visto afectada por ningún proceso físico, salvo la interacción gravitatoria con el resto de la materia. Las fluctuaciones que veamos en gran escala angular (por encima de unos 2 grados de arco: la escala angular con la que se observa la distancia recorrida por la luz desde el instante inicial hasta el tiempo de recombinación de los elementos) serán las mismas del momento de su creación, y es en este sentido en el que podemos decir que el *COBE* fotografió el universo primitivo.

Los radiómetros instalados a bordo del satélite han levantado 3 mapas de temperatura del cielo midiendo la diferencia de temperaturas en dos direcciones, separadas 60 grados, mediante dos antenas de 7 grados de diámetro y a tres frecuencias diferentes: 31,5, 53 y 90 gigahertz (correspondientes a las longitudes de onda 9,5, 5,7 y 3,3 milímetros). Se procuró que la emisión de la galaxia fuera mínima y la de la RFM máxima. La medición en diversas frecuencias nos permite discernir entre la emisión del polvo y gas de nuestra galaxia (principal fuente contaminante) y la cósmica, ya que esta última posee un espectro térmico peculiar. Así pudo el experimento del DMR detectar la primera anisotropía en la temperatura de la RFM, después de una exhaustiva sustracción de todas las fuentes que contribuyen a enmascarar el fondo: Luna, Júpiter, campo magnético terrestre, dipolo debido al movimiento de *COBE* respecto a la RFM y la emisión proveniente de la Vía Láctea.

Se han obtenido tres mapas de temperatura de la RFM en todo el cielo a tres frecuencias distintas. Se advierte una dispersión para las diferencias de temperatura, con respecto al valor medio, de sólo una parte en cien mil. Esta mínima divergencia en las temperaturas confirma que hubo pequeñas diferencias en la densidad de materia en distintas partes del universo, como se requiere en la hipótesis de que las galaxias y demás estructuras surgieron del colapso gravitatorio de dichas inhomogenei-

dades primordiales. Pero la verdad es que las inhomogeneidades detectadas por el *COBE* podrían atribuirse a la distribución de energía inicial (la correspondiente a muy gran escala); ésta se prolongaría a otras escalas, las que darían lugar a la formación de la gran escala (vacíos, grandes atractores, filamentos) y la pequeña escala (cúmulos y galaxias).

Ha costado mucho tiempo y esfuerzo detectar anisotropías en la temperatura de la RFM, empeño en el que participaron el experimento de Tenerife y el experimento RELICT-1. El experimento de Tenerife, colaboración anglo-española entre la Institución Jodrell Bank y el Instituto de Astrofísica de Canarias, se apoya en tres radiómetros independientes situados en el Observatorio del Teide y que operan a 10,5, 15 y 33 gigahertz. Miden la temperatura del cielo en dichas frecuencias y emplean, para ello, la técnica de "dobles diferencias", que aporta la diferencia de temperaturas entre una dirección central y la media de dos direcciones adyacentes equidistantes de la central. Los últimos resultados del experimento a 15 gigahertz proporcionan una cota superior a la dispersión de la temperatura de la RFM de unas dos veces la detección del *COBE*.

¿Queda algún rastro de las inhomogeneidades primitivas de pequeña y gran escala? El interés de las anisotropías por debajo del grado de arco reside en que, en estas escalas, operan procesos físicos que conducen a la formación de estructuras y macroestructuras. La anisotropía final resultante dependerá del modelo de formación de galaxias que pongamos como dato de entrada y, particularmente, de la composición de la materia (bariónica y no-bariónica) y del tipo de fluctuación inicial. El estudio de las anisotropías a estas escalas angulares, a diferencia de las de escalas mayores que nos mostraban las fluctuaciones iniciales, nos informa sobre la evolución de la materia, desde el tiempo de recombinación hasta el momento actual. No se ha detectado todavía nada a este respecto.

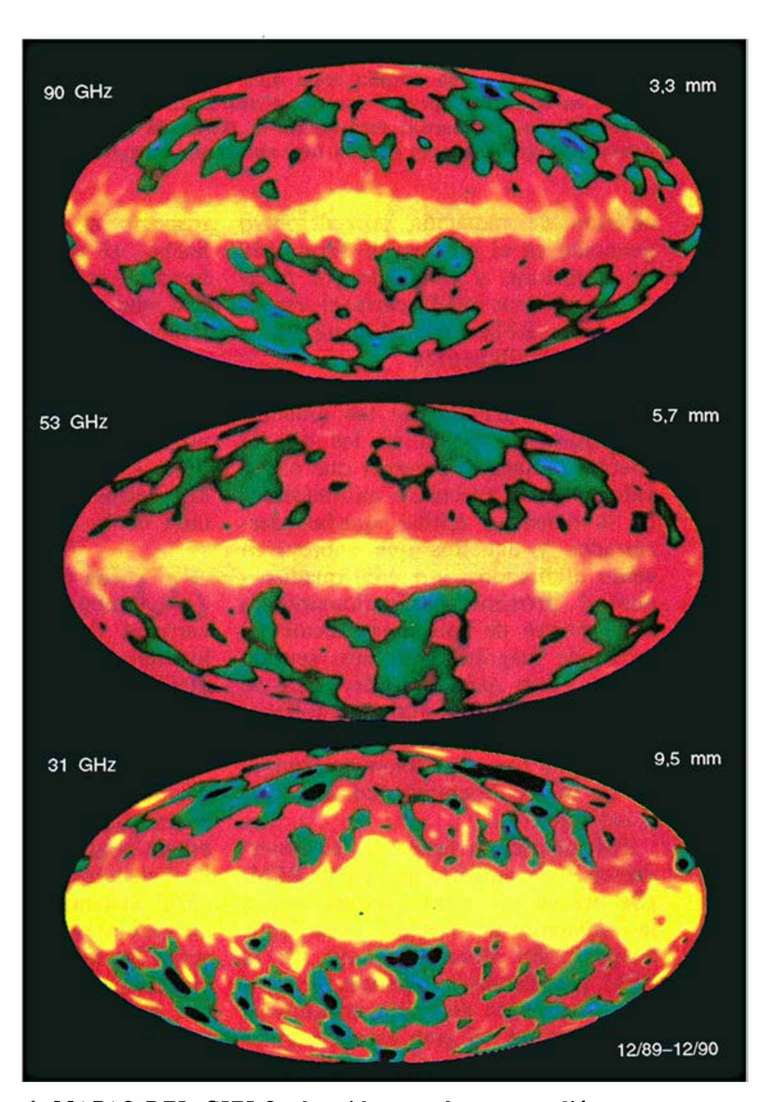
Lo más notable a estas escalas cabe apuntárselo al trabajo del radiotelescopio estadounidense OVRO (Radioobservatorio del Valle del Horno), de 40 metros, a una frecuencia de 20 gigahertz. Siguiendo la técnica de dobles diferencias y midiendo en una pequeña región del cielo de un grado alrededor del polo Norte, este experimento impuso una fuerte cota superior en la anisotropía relativa de 2 partes en 100.000 en una escala angular de 3 minutos de arco. Sin embargo, el experimento más reciente llevado a cabo en escalas por debajo del grado es el UCSB (Universidad de California en Santa Bárbara) en el polo Sur. Aprovechando la poca humedad relativa de la atmósfera a esas bajas latitudes, establece una cota de 4 partes en 100.000 en escalas angulares de medio grado de arco. El sentido físico de estas cotas por debajo del grado de arco reside en los fuertes límites que nos imponen sobre la formación y evolución de las galaxias y cúmulos.

¿Cuáles son las causas de la anisotropía? En el tiempo de recombinación aparecieron tres tipos de anisotropía primigenia intrínseca en la temperatura de la RFM: *1*) la debida al diferente potencial gravitatorio, que experimentan los fotones que se propagan en direcciones distintas (efecto Sachs-Wolfe), *2*) la debida a la diferente velocidad de las regiones emisoras de los fotones de microondas (efecto Doppler de los emisores), y *3*) la debida a las fluctuaciones en la densidad de energía de los fotones, que dependen directamente del tipo de fluctuaciones iniciales que emergen de la fase inflacionaria del universo.

De estas tres causas de anisotropía, la primera tiene que ver con la ganancia (o pérdida) de energía de los fotones de microondas, al experimentar éstos el campo gravitatorio creado por las inhomogeneidades de densidad presentes durante la fase de recombinación; éste es el tipo de anisotropía observado por el *COBE*.

El origen de las inhomogeneidades en la densidad de materia podría encontrarse en la etapa inflacionaria del universo, cuando éste cumplía entre 10^{-43} y 10^{-33} segundos; fue un intervalo de drástica expansión que borró las huellas de su historia para convertirse en un universo extremadamente homogéneo donde las fluctuaciones cuánticas que tienen lugar al final de la inflación generan allí las semillas que mucho más tarde germinarán y darán por resultado la rica estructura de agregaciones de galaxias. Las pequeñas irregularidades así generadas son de tipo adiabático, es decir, conservan el número de fotones por barión. Además, la distribución de las fluctuaciones en la densidad son invariantes con la escala, o sea, las desviaciones de la densidad media son iguales (en promedio), con independencia de la escala que estemos mirando.

En razón de la inflación, vivimos en un universo plano, en una suerte



6. MAPAS DEL CIELO obtenidos por los tres radiómetros del *COBE* a lo largo de un año, que operan a 90, 53 y 31 gigahertz (*fotografías de la izquierda*), donde se aprecia la contribución de nuestra galaxia. En la parte de la derecha

de globo que se ha hinchado considerablemente. Y acorde con ello, la geometría del espacio será la geometría euclídea y su densidad coincidirá con la "densidad crítica", lo que implica que se halle en un estado de expansión permanente. La hipótesis de la inflación puede además explicar por qué zonas causalmente desconectadas en la recombinación aparecen, sin embargo, muy similares, a tenor de la mediciones de temperatura realizadas por *COBE*; ello se debe a que estas zonas estuvieron conectadas en tiempos anteriores a la fase fuertemente expansiva de la inflación, para desconectarse después. Vemos, por tanto, que el período inflacionario constituye un componente fundamental para entender el origen y la evolución del universo.

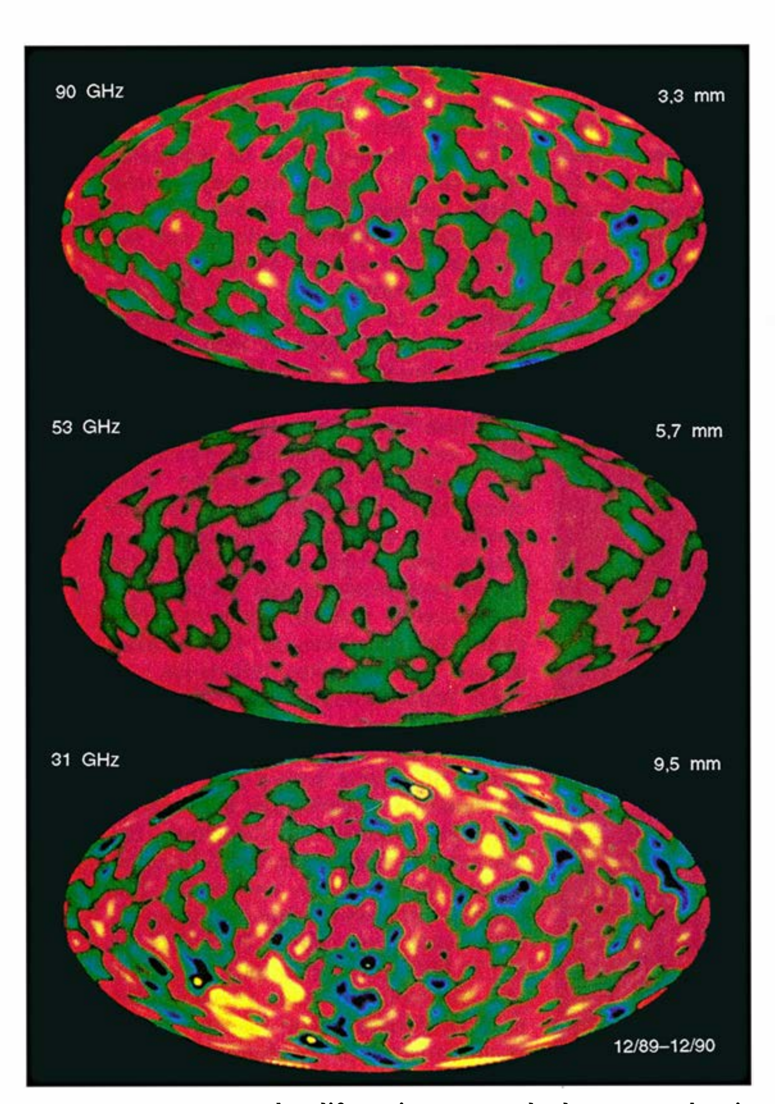
Una vez que la inflación ha sembrado de inhomogeneidades de densidad el universo entero, la fuerza de la gravedad se encargará de alimentar la condensación de la materia (inestabilidad gravitacional); antes del tiempo de recombinación la presión en contra ejercida por la radiación no permitía dicha condensación. Este lento e imparable proceso de acreción de materia dará como resultado, después de miles de millones de años, las galaxias.

La mayor parte de la materia del universo es oscura dependiendo del tipo de partícula que forme esta materia que no se deja detectar a ninguna frecuencia del espectro de la luz; y dependiendo en particular de la distancia que son capaces de recorrer desde el comienzo del universo, los escenarios de formación de galaxias se dividen en dos: "arriba-abajo" y "abajo-arriba". En el primero, domina la materia oscura caliente, así calificada en alusión a la alta velocidad de sus partículas; en el segundo, la materia es fría y los representantes de este escenario son partículas exóticas, cuya existencia se desconoce. El escenario "arriba-abajo" predice que las primeras estructuras que se formaron fueron las mayores (supercúmulos), de las que, por fragmentación, derivarían las galaxias. En el escenario de "abajo-arriba" aparecen primero las galaxias, siendo cúmulos y supercúmulos el resultado de su agrupamiento.

Cuando comparamos las predicciones de los diferentes modelos sobre la anisotropía de la RFM con las medidas obtenidas por *COBE*, descubrimos que las hipótesis que admiten la existencia de sólo bariones producen anisotropías demasiado grandes. En cambio, los modelos que incluyen la existencia de materia oscura no-bariónica, fría o caliente, sí están de acuerdo con las medidas del satélite. La limitación de nuestros conocimientos no se reduce a la naturaleza de las partículas componentes de la materia que falta; queda todavía por aclarar el valor del parámetro densidad Ω (cociente de la densidad promedio del universo sobre la densidad crítica), la constante de Hubble H_0 y la proporción de materia bariónica frente a materia oscura, factores todos que condicionan las predicciones. Valores altos de Ω así como de H_0 tienden a bajar las anisotropías, mientras que una mayor proporción de bariones las incrementa.

Finalmente, si tenemos en cuenta además del FCM otros tests observacionales, parece un tanto complicado satisfacerlos a la vista de los modelos actuales. Si nos olvidamos de las teorías más extravagantes, existen 3 posibilidades: *1*) el modelo de materia oscura fría ha sido el paradigma durante los últimos años, con unas reglas muy definidas para calcular las predicciones sobre los diversos tests, pero tiene su talón de Aquiles en la incapacidad de explicar el agrupamiento de las galaxias en escalas grandes, así como la época de formación de cúmulos. *2*) El modelo de materia oscura caliente, con el neutrino masivo como la hipotética partícula representando la componente dominante de la materia, adolece de una guía clara para la identificación de las estructuras y cuenta con dos problemas fundamentales: el agrupamiento de las galaxias no sigue las observaciones y la época de formación de galaxias es demasiado cercana al tiempo actual. *3*) Además, el modelo de P. J. E. Peebles, de baja densidad y con sólo bariones, que satisface diversos tests observacionales ajustando muchos parámetros libres.

¿Qué sobrevivirá de todo esto? Indudablemente, la detección de alguna nueva partícula elemental —que está en la base de algunos de los modelos— ayudaría bastante en la configuración de lo que podría ser el modelo definitivo de formación de galaxias, ¡el auténtico rompecabezas cosmológico!



se representan las diferencias entre cada dos mapas obtenidos a la misma frecuencia y, por tanto, no aparecen ni la señal cosmológica ni la señal de nuestra galaxia; sólo queda el ruido instrumental.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LOS TRES PRIMEROS MINUTOS DEL UNIVERSO. S. Weinberg, vol. 216. Alianza Editorial, 1978.

THE BIG-BANG. J. Silk. W. H. Freeman and Co., Nueva York, 1980.

SUPERFUERZA. P. Davies, Biblioteca Científica Salvat, vol. 4. Salvat Editores, 1985.

Ciencia y empresa

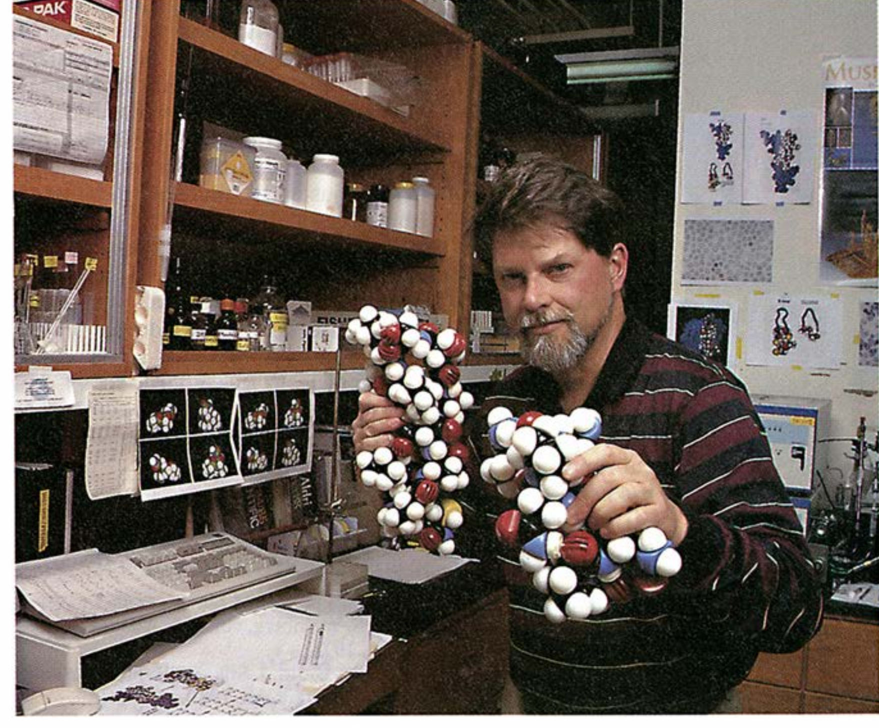
Regreso a lo esencial

Vacuna contra la malaria

En la secular batalla de la humanidad contra la malaria, la mejor parte la llevan hasta ahora los parásitos. A medida que los protozoos *Plasmodium*, transportados por mosquitos, van pasando por las muchas fases de que consta su ciclo vital, alteran su estructura y burlan al sistema inmunitario. Así, durante decenios, la malaria ha frustrado todos cuantos esfuerzos se han empeñado en elaborar una vacuna, y ha desarrollado su resistencia contra los fármacos. La enfermedad arrasa ahora sin control el Sureste asiático, Sudamérica y especialmente Africa. Solamente en el Africa subsahariana, mueren cada año de ella o de sus secuelas entre 1,5 y dos millones de niños.

"Hace casi 20 años que queremos asestarle el golpe de gracia a la malaria y buscamos la vacuna estable que lo consiga", afirma John B. Dame, profesor del departamento de enfermedades infecciosas de la Universidad de Florida. Y añade: "no me parece que eso pueda salir bien. Hay que invertir más dinero en el conocimiento básico del protozoo." Dame y sus colaboradores actúan en consecuencia: han emprendido la secuenciación de los genes del parásito de la malaria, en su cepa más virulenta: *P. falciparum*, la única que puede ser letal de las cuatro existentes y a la que se deben el 90 por ciento de las infecciones palúdicas en Africa.

Se estima que el genoma de la malaria contiene entre 5 y 10.000 genes activos. Al paso actual, el grupo podría secuenciar las 300 bases más externas de 5000 genes en unos dos años. Como los genes se toman al azar, el ritmo se hará más lento a medida que las redundancias vayan aumentando su frecuencia. Sin embargo, el grupo de Dame está convencido de que los datos que obtiene permitirán que se modifique el complicado ciclo vital del parásito. "Hasta ahora, del millar de genes que hemos secuenciado, solamente para 125 hay algo que se les asemeje. Es decir, un 90 por ciento de lo que estamos viendo es o exclusivo del *Plasmodium* o nuevo para la ciencia", confiesa Sheldon M. Schuster, director del proyecto "Genoma de la malaria".



Arnold C. Satterthwait modela dos péptidos sintéticos que un día podrían utilizarse como parte de una vacuna multifase contra la malaria.

Pese al limitado conocimiento del protozoo, el Instituto Walter Reed, entre otros, ha elaborado varias vacunas subunitarias. Constan éstas de tres partes. El antígeno central se toma de una zona vulnerable del parásito, o se sintetiza para que así lo parezca, a fin de producir anticuerpos y células *T* asesinas que inutilizarán el parásito. Unida a esta sección se encuentra una proteína portadora, que estimula a las células *T* coadyuvantes producidas por el sistema inmunitario del recipiendario. Por último, un auxiliador que contribuye a que el sistema inmunitario reúna suficientes legiones de anticuerpos.

El secreto estriba en escoger los péptidos, o fragmentos de proteína, y emplearlos como antígenos, para conseguir que el sistema inmunitario los reconozca como foráneos. "Pero esas proteínas no son muy inmunogénicas", dice Ballou.

De ahí la necesidad de auxiliares apropiados, aunque no hay mucho donde escoger. En el Walter Reed se ensayan dos nuevos auxiliares con sus vacunas: uno se basa en un detergente de la corteza del árbol *Quillaja saponari*; el otro es un compuesto graso llamado lípido A monofosfórico, producido por RIBI ImmunoChem de Hamilton.

Ballou cree que el auxiliar de RIBI es particularmente prometedor. Los expertos de SmithKline Beecham han combinado el compuesto lipídico A con moléculas de liposomas y dos antígenos sintéticos diferentes para producir dos vacunas; éstas atacan la fase de esporozoito del ciclo vital del protozoo, la transmitida por los mosquitos infectados.

En Walter Reed se proyectan también unas pruebas de campo de una potente, en principio, vacuna antimalárica. Su agente activo es un péptido sintético desarrollado hace varios años por Manuel E. Patarroyo, del Instituto de Inmunología del Hospital de San Juan de Dios en Bogotá, Colombia. Patarroyo sostuvo que su vacuna había protegido al 70 u 80% de los 30.000 voluntarios que la recibieron. Sin embargo, ni la vacuna ni las pruebas cumplían con las normas de la administración estadounidense.

Nuevos ensayos llevados a cabo en Colombia, mejor controlados esta vez, arrojaron una tasa de protección comprendida entre el 30 y el 60 %, mucho más alta aún que la de nin-

guna otra vacuna contra el paludismo. El Instituto Walter Reed contrató a la empresa Multiple Peptide Systems, para que reprodujese la fórmula. Las pruebas clínicas provisionales han demostrado que el producto no es perjudicial.

Como la vacuna de Patarroyo sólo actúa contra los merozoitos del *falciparum*, fase del parásito que destruye los glóbulos rojos de la sangre de los individuos infectados, su fracaso podría resultar letal para los voluntarios. Deben, pues, realizarse pruebas de campo comparativas con individuos ya en peligro; dar con ellos es alarmantemente fácil. En Africa, observa Campbell, "trabajamos en una zona donde más del 70 por ciento de los niños de seis a ocho meses habrán sufrido al menos una infección de malaria".

Siendo la malaria tan infecciosa, y tan rápida su adaptación a nuevos fármacos y vacunas, se necesitará un ataque combinado si se quiere asestarle un golpe mortal. "La vacuna ideal sería la que que atacase al parásito en diferentes momentos de su ciclo vital", dice Arnold C. Satterthwait, bioquímico del Instituto de Investigación Scripps de La Jolla.

Una vacuna así induciría un anticuerpo, aislado por David C. Kaslow, del Instituto Nacional de la Salud, que bloquea el desarrollo de la malaria en el estómago del mosquito, impidiendo así que se infecte. Es eficaz al 100 %.

Como parte de una vacuna multifase, los antígenos que estimulan dichos anticuerpos de bloqueo podrían evitar la reproducción de cualesquiera parásitos que desarrollen resistencia. Con ese fin, Satterthwait y sus colaboradores Enrico A. Stura y Angray Kang están cartografiando la estructura tridimensional del anticuerpo, y tratan de sintetizar un antígeno adecuado.

Lejano parece estar todavía el día que tengamos una vacuna multifase eficaz contra la malaria. Pero si la nueva información genética pudiera combinarse con nuevas técnicas bioquímicas y la experiencia clínica, el optimismo tendría mayor respaldo.

El botiquín de Pandora

Pero hay medicinas en las ranas, polillas, tiburones...

Jay Moorin, presidente de Magainin Pharmaceuticals, querría que tuviésemos en nuestro botiquín doméstico una ranita o un trocito de tiburón. En los laboratorios de la compañía, se extraen sustancias de animales tan dispares como los tiburones de arena y los sapos de espuelas africanos, que van mostrando buenas condiciones para el tratamiento de infecciones, curación de heridas y eliminación de ciertos tumores. "Buscamos compuestos farmacéuticamente activos en los sistemas de defensa de los animales, el del hombre incluido." dice.

Uno de los mercados farmacéuticos en que mejor podrían darse a conocer los nuevos compuestos de origen animal es el de los antibióticos. La industria farmacéutica está buscando siempre nuevos antibióticos, que se diferencien lo más posible de los que ya han perdido su eficacia. Los productos derivados de animales pueden llenar ese hueco. En su mayoría, son péptidos, o pequeñas proteínas, que actúan de manera completamente distinta de los antibióticos y antifúngicos tradicionales. Muchos exterminan toda una batería de microorganismos patógenos, y su acción podría ser, quizá, mucho más duradera.

De estos compuestos, ninguno más avanzado en su desarrollo industrial que las magaininas. Las descubrió en 1986 Michael A. Zasloff, entonces adscrito al Instituto Nacional de la Salud. Zasloff, en sus experimentos, extirpaba los ovarios a ranas, cosía las incisiones y devolvía los animales a los turbios tanques donde vivían. Como habían hecho muchos científicos antes que él, se preguntó por qué las incisiones se curaban siempre deprisa y no se infectaban nunca a pesar de la abundancia de bacterias en el agua. Y se esforzó por averiguar la causa. Aisló dos moléculas de la piel de las ranas que tenían propiedades desinfectantes, y por nombre les dio la palabra hebrea que significa escudo. Zasloff abandonó al año siguiente el INS y fundó Magainin Pharmaceuticals.

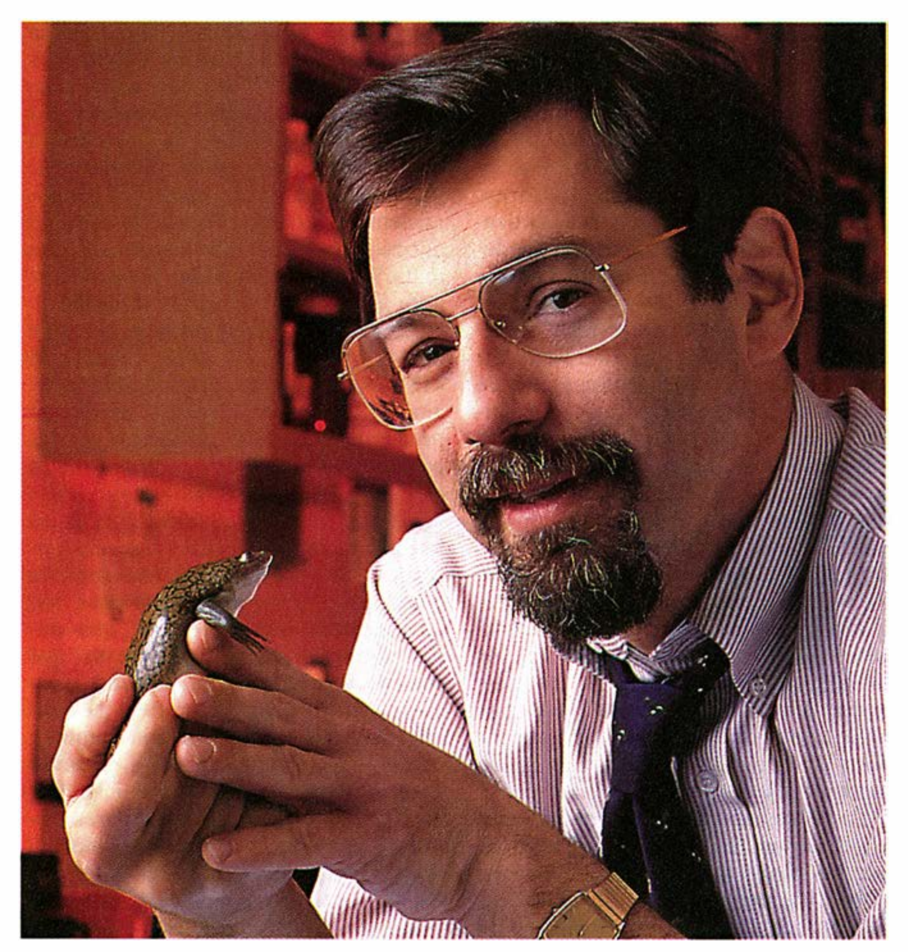
Variando la estructura química de esas originales moléculas, los investigadores han aumentado hasta cerca de 2000 el número de magaininas. "A diferencia de los antibióticos corrientes, que actúan esencialmente en el interior de la bacteria, las magaininas perforan su membrana celular", explica Moorin. "La célula entonces se marchita y muere". Añade que durante los estudios de laboratorio las bacterias no han desarrollado resistencia alguna a las magaininas.

Magainin Pharmaceuticals ha mejorado recientemente la técnica con que fabrica estos compuestos. "Las ranas del mundo pueden estar tranquilas", bromea Moorin. "No hay prensas para machacar anuros en la rebotica." Y nunca las ha habido: los químicos sintetizaban las moléculas, en un proceso lento y costoso. El pasado noviembre, la compañía anunció que se podían obtener magaininas a partir de bacterias genéticamente alteradas. "Como se trata de antibióticos, muchos pensaban que matarían al organismo hospedador; pero no es así", comenta Moorin.

El producto magainínico al que menos le falta para estar listo es el MSI-78, un agente antimicrobiano de amplio espectro. Según Moorin, el producto completó recientemente la primera fase de las pruebas clínicas con seres humanos. Si supera todas las etapas legales, podría llegar a las farmacias en dos o tres años. Inicialmente, el MSI-78 se promocionará como desinfectante para úlceras cutáneas, pero Moorin espera que podrá venderlo como tratamiento que acelere la curación de heridas, mercado más amplio y lucrativo. Magainin Pharmaceuticals trabaja también con Colgate-Palmolive en la creación de productos para la salud bucal. Las magaininas o sustancias similares podrían agregarse a la pasta de dientes o a los enjuagatorios como elementos de control de la placa bacteriana.

Magainin Pharmaceuticals espera entrar también en el campo de la terapéutica del cáncer. "Nuestra teoría es que en ciertos tumores hay regiones que tienen el aspecto de membranas de células bacterianas, y por eso las magaininas dan resultado en algunos cánceres y no en otros", explica Moorin. Asegura que en las pruebas con animales los compuestos se han mostrado efectivos en los cánceres de colon, por ejemplo, pero no en los cánceres de ovarios. En diciembre pasado, Magainin Pharmaceuticals y Sandoz Pharmaceuticals cerraron un trato para investigar el potencial anticancerígeno de las magaininas.

Las magaininas no son los únicos antibióticos obtenidos de animales, ni tampoco han sido los primeros. A finales de los años setenta, Hans G. Boman, de la Universidad de Estocolmo, extrajo péptidos antimicrobianos de las polillas *Cecropia*, y los llamó cecropinas. Escasos años después, un grupo de la Universidad de California en Los Angeles, entre ellos Richard L. Lehrer, Thomas Ganz y Michael E. Selsted, dieron el nombre de defensinas a una clase de péptidos que compartían una estructura general común. Estas moléculas son producidas por células del sistema inmunitario que rodean a los patógenos invasores; las defensinas



Michael A. Zasloff, de Magainin Pharmaceuticals, está convirtiendo proteínas defensivas de la piel de anfibios en nuevos fármacos.

destruyen los invasores creando agujeros en sus membranas externas.

Un descubrimiento más notable, sin embargo, es que también se producen defensinas en células epiteliales que tapizan las superficies húmedas del cuerpo de los mamíferos. Hace cinco años, al estudiar el desarrollo de los ratones, Andrew J. Ouellete, de Boston, descubrió defensinas en el intestino delgado. Selsted, de la Universidad de California en Irvine, y Charles L. Bevins, del Hospital Infantil de Filadelfia, también han encontrado, por separado, las mismas clases de células en seres humanos.

"El colon vive atestado de bacterias, pero el intestino delgado es relativamente estéril", observa Bevin. "Nuestra hipótesis de trabajo es que esos péptidos esterilizan el medio". Las defensinas y otros péptidos similares quizá sean, por tanto, la "primera línea de defensa" del organismo contra bacterias, hongos y virus. En confirmación de esa hipótesis, Bevin y sus colaboradores han hallado péptidos antimicrobianos —similares, aunque no idénticos a las defensinas— en el tapiz epitelial de los pulmones de bobinos.

Selsted advierte que el potencial farmacéutico de las defensinas, magaininas y otros péptidos similares probablemente dependerá del sistema de administrarlas. Como algunos de los péptidos puede tener alta toxicidad, tal vez sea necesario, para regular su administración, envolverlos en pequeñas bolsas de grasa llamadas liposomas. Su grupo trabaja en un proyecto patrocinado por el INS, dirigido a desarrollar nuevos agentes antifúngicos. Se centrará en tres grupos de péptidos: las defensinas, una familia de moléculas emparentadas (las beta-defensinas) y la indolacidina, molécula suelta que su grupo aisló del sistema inmunitario de los bovinos.

Acaso sea la escualamina, descubierta por Magainin Pharmaceuticals el año pasado, la adición más singular a la lista de antimicrobianos derivados de animales. Las escualaminas, que circulan en la sangre de los tiburones, son esteroides y no péptidos. Los tiburones raramente se infectan y casi nunca sufren cáncer.

Rico en gravedad

Los cristales sometidos a grandes fuerzas centrífugas son más perfectos

La creación de cristales perfectos era una de las razones que con preferencia se esgrimía cuando había que justificar las costosísimas inversiones de los laboratorios orbitales. En la microgravedad, los materiales fundidos se cristalizan con menos burbujas, defectos y dislocaciones que en condiciones más corrientes. Pero los cristales producidos durante los viajes de los transportadores espaciales han sido más bien decepcionantes, y el precio, demasiado alto para los resultados obtenidos. La gravedad normal siembra la destrucción en los cristales al tirar con más fuerza, durante la cristalización de la sustancia fundida, de las regiones más frías de ésta, y por tanto más densas, que de las partes más calientes. Se produce entonces una convección, causa de los defectos que el material ya solidificado presentará. Sin embargo, hay cada vez más pruebas, contra toda intuición, de que una fuerte gravedad genera mayores y mejores cristales.

Nadie sabe con seguridad por qué es así. Parece que la centrifugación estabiliza el flujo convectivo de la sustancia fundida mientras se solidifica. Lo cierto es que hay ciertos valores discretos de la aceleración centrífuga (variables de una sustancia a otra) que uniformizan la cristalización. Liya A. Regel, directora del centro de investigación del crecimiento de cristales en condiciones de fuerte gravedad adscrito a la Universidad de Clarkson, califica de "mágicos" esos valores. La centrifugación, además, puede mejorar las propiedades eléctricas de las aleaciones y elevar la temperatura de transición de los superconductores de alta temperatura.

En realidad, hará más de veinticinco años que se conoce este fenómeno. Allan E. Carlson, físico de estado sólido, señaló ya en 1958 la importancia de la convección en el crecimiento de los cristales a partir de disoluciones. La mayor parte de la experimentación en este campo se ha venido efectuando en la antigua Unión Soviética, Alemania y Francia, y las publicaciones en inglés no le han prestado mucha atención. A mediados de los ochenta, George Müller, de la Universidad de Erlangen, descubrió que la centrifugación reducía la formación de estrías en cristales semiconductores. Huguette

Rodot, del laboratorio del CNRS en Meudon, y Regel, que entonces trabajaba en el Instituto de Investigaciones Espaciales de Moscú, hallaron efectos similares. Un simposio celebrado en Dubna, Rusia, en mayo de 1991 reunió por primera vez a muchos especialistas en los fenómenos propios de la gravedad intensa.

Disponer de las máquinas adecuadas es difícil; ésta es otra barrera que ha impedido el progreso de la investigación del crecimiento de cristales en condiciones de alta gravedad. Paul J. Shlichta, de Crystal Research, ha tenido casi que mendigar el tiempo que se le haya concedido para hacer uso de centrifugadoras. Cuando trabajaba en Moscú, Regel logró que se le otorgase una semana en el Centro Gagarin, de formación de astronautas. El instrumental requiere, además, una preparación adecuada. La nueva centrifugadora de la Universidad de Clarkson, que puede generar unas quince veces la fuerza de la gravedad terrestre, si bien se ha adquirido ya usada, ha sido oportunamente modificada.

Las empresas empiezan a sentirse atraídas por este campo. Sin embargo, aún no sería práctica la producción comercial de cristales por este método. "La producción de cristales de arseniuro de galio para la fabricación de semiconductores llevaría un día entero", dice Regel. El arseniuro de galio fundido se introduciría en un crisol colocado en un extremo de la centrifugadora, y ésta lo haría girar de 8 a 12 horas, hasta que se solidificase. La carga del crisol estaría, además, limitada.

Shlichta experimenta un método de crecimiento de los cristales mucho más rápido. Emplea una pequeña centrifugadora de alta velocidad que genera fuerzas de gravedad intensísimas —de cientos a cientos de miles de veces la gravedad normal—. La fuerza arranca el soluto del disolvente. A unas 41.000 veces la gravedad corriente se producen limpios cristales de nitrato de plomo, lo que augura que quizá podrían tener usos ópticos.

Pero los cristales crecidos con gravedad intensa, tan prometedores, no han derretido precisamente los corazones de las instituciones que podrían patrocinar su desarrollo. Será porque chocan con el pensamiento convencional. "Siempre te preguntan si no ha habido un error en el experimento", dice William R. Wilcox, uno de los directores del programa de investigación de la Universidad de Clarkson. Aún más desafortunado ha sido, si cabe, Shlichta en su búsqueda de fondos. Quizá cambien las cosas pronto gracias a la centrifugadora de Clarkson. Se ha convocado una segunda reunión internacional. Los investigadores de la gravedad intensa no pretenden que sus cristales desplacen a los producidos mediante microgravedad, pues las propiedades de uno y otros son ligeramente diferentes.



Liya L. Regel, sentada tras la nueva centrifugadora de la Universidad de Clarkson, en su origen una taladradora proyectada para tornear piezas mecánicas circulares. El crisol donde crecen los cristales está colocado al extremo del brazo de la centrifugadora (que es la viga roja con sección en I.

¿Gallinas claustrofóbicas?

La necesidad de espacio

Por razones económicas, el espacio de que disponen los animales domésticos es limitado. A mayor densidad viable, mayor rentabilidad de la granja. Los grupos de protección de los animales se conmueven ante la exigüidad de las jaulas en las que viven las gallinas, y la Comunidad Económica Europea ha ordenado que el espacio de cría de las gallinas ponedoras no sea inferior a 450 cm^2 por animal. Este límite, ¿es suficiente o excesivo? Al margen de los argumentos económicos, las justificaciones de los criadores por la gran densidad de cría son pobres: "Mis gallinas ponen, así que estarán bien". Las asociaciones de protección de los animales no tienen argumentos más válidos, ya que su discurso suele ser antropomorfo: "¿Le gustaría a usted vivir en esas condiciones?"

Sólo las propias gallinas podrían zanjar este debate. La técnica del condicionamiento operante permite que así sea: aprenden a pulsar un botón que amplía la caja, y se comprueba si se dan a sí mismas ese espacio que, según algunos, parece que les falta.

Con ese fin, hemos preparado en la Station INRA de Nouzilly un modelo de jaula en el que una de las paredes se mueve (unos diez centímetros) cada vez que una gallina pulsa un botón. Su superficie mínima, 1600 cm^2, es inferior a la norma europea, y la máxima, 6100 cm^2. Después de cada pulsación, la pared regresa suavemente (diez centímetros en cinco minutos) a la posición inicial, pero una nueva pulsación permite a las gallinas volver a moverla una distancia similar al espacio desplazado tras la primera pulsación. Siempre hemos estudiado grupos de cuatro gallinas, que es el número utilizado por los criadores.

La observación de las gallinas ponedoras en este tipo de gallineros ha demostrado, en primer lugar, que las



Jaula experimental cuya superficie modifican las gallinas pulsando un botón; en cada jaula hay cuatro animales, como en los criaderos.

gallinas se esfuerzan poco por ampliar el tamaño de su jaula, pues rara vez pulsan el botón. Para hablar con mayor precisión, si un grupo de cuatro gallinas pulsa unas 2000 veces en 24 horas para conseguir alimento, el número de pulsaciones efectuadas para agrandar el gallinero es ¡sólo de un centenar por día!

Con las gallinas en una caja pequeña como punto de partida, supusimos que, si cambiábamos la magnitud de la recompensa (de manera que la pared avanzase sólo, por ejemplo, cinco centímetros en lugar de diez), pulsarían más a menudo, para que la jaula tuviese siempre un tamaño apropiado. Sin embargo, el número de pulsaciones fue el mismo que en el caso de los animales que disponían de más espacio.

¿Por qué? ¿Acaso no entendían las gallinas el mecanismo de la jaula especial donde se las había colocado? Para estudiar esta cuestión, emprendimos un experimento en el que las gallinas podían aumentar o disminuir la superficie del gallinero, partiendo de dos superficies iniciales, de 2500 cm^2 y de 4300 cm^2. Al comparar estas cuatro situaciones con lo que ocurría cuando la jaula tenía 1600 cm^2, observamos que el esfuerzo que las gallinas hacían para agrandar una jaula de 2500 cm^2 era el mismo que hacían para agrandar la de 1600 cm^2. Por el contrario, no se esforzaban casi nada en ampliar una jaula de 4300 cm^2 ni intentaban reducir la de 2500 o de 4300 cm^2. Parecía que las gallinas adaptaban su comportamiento a las dimensiones de la jaula donde estaban y al sentido de desplazamiento de la pared, y comprendían el mecanismo.

En todas estas pruebas, las gallinas habían estado en las jaulas por lo menos diez semanas. ¿Se habrían habituado? Para responder a esta pregunta comparamos grupos de gallinas que habían estado en un principio en el suelo (seis metros cuadrados para un grupo de cuatro gallinas) con gallinas criadas en gallineros (1800 cm^2 para cuatro animales): las que estaban acostumbradas a mucho espacio trabajaban aproximadamente diez veces más que las otras en agrandar el tamaño de su jaula. La conclusión era clara: las gallinas se acostumbran a su jaula y tardan menos de seis semanas en adaptarse.

Del conjunto de nuestros experimentos cabe concluir que las gallinas son capaces de aprender a utilizar el mecanismo de pulsación de un botón para modificar la superficie de la jaula en la que se encuentran, y que adaptan su comportamiento a la situación experimental. Sin embargo, trabajan poco para agrandarla, y no se esfuerzan más aunque varíe la recompensa por su trabajo.

Dicho de otra forma, la necesidad de espacio de las gallinas criadas en gallinero es satisfecha por las jaulas clásicas, salvo en el período de adaptación, que es corto. Por último, los tics de las gallinas (sus incansables balanceos, por ejemplo, análogos a los que hacen los caballos que salen muy poco de su cuadra no son consecuencia del tamaño de la jaula, sino, con mucha más probabilidad, de la pobreza del medio. (Jean Michel Faure, de la Station INRA de Nouzilly.)

Matemática aplicada

Verificación de programas

Por lo general, las investigaciones matemáticas no tienen más objetivo que hacer progresar las matemáticas mismas. Ocurre, sin embargo, que las matemáticas tienen aplicaciones en dominios muy diversos. Tal es hoy el caso de las investigaciones sobre la demostración de teoremas con auxilio de ordenador, que han venido a servir para la verificación de programas informáticos.

Desde un punto de visto matemático, un programa no es más que un teorema, es decir, una proposición enunciada en un sistema de axiomas dado y perfectamente demostrable. La única diferencia reside en la naturaleza del sistema de referencia. Las matemáticas estudian sobre todo sistemas encaminados a la descripción del mundo real (el conjunto de los números enteros o el conjunto de los números reales); en la informática, en cambio, el sistema depende por entero del contexto de utilización del programa.

Todo programa contiene errores; es inevitable. A fin de minimizar los riesgos, los programas informáticos suelen, en general, ser concebidos por varios programadores que trabajan en paralelo, que se entrecruzan sus resultados y se los verifican unos a otros. Y todavía, después, son sometidos a una "auditoría": su correcto funcionamiento es puesto a prueba mediante una batería de tests.

A menos que se efectúe una infinidad de pruebas se corre el riesgo de pasar por alto errores, que no se pondrán de manifiesto sino en casos muy excepcionales. El único medio seguro consiste en verificar por completo la formulación de los programas, ¡lo que equivale a verificar la demostración de un teorema! Este trabajo, largo y fastidioso, resulta más difícil todavía debido a que no suele efectuarlo el creador del programa. Además, su interés matemático es muy reducido, porque los programas, incluso los más importantes, suelen constituir teoremas triviales. De aquí la idea de utilizar un ordenador provisto de un sistema de verificación automática.

El interés de los matemáticos por las posibilidades del ordenador como

auxiliar en la demostración de teoremas se despertó en los años sesenta. En aquellas primeras tentativas se trataba solamente de hacer enumeraciones. La informática permitió demostrar, por ejemplo, que la conjetura de Euler era falsa. Euler había juzgado que la ecuación $x^n{}_1 + x^n{}_2 ... + x^n{}_m = z^n$, donde m es menor que n, carece de soluciones cuando n es mayor que 2, pero no proporcionó demostración. En 1966, L. Landen y T. Parkin descubrieron un contraejemplo al enumerar todas las posibilidades con un ordenador: $27^5 + 84^5 + 110^5 + 133^5 = 144^5$. Sin embargo, aunque es un instrumento útil, la enumeración no aporta solución a la demostración de teoremas más generales, en cuyo enunciado se combinen cuantificadores universales (para todo x...) y cuantificadores existenciales (existe *un y* ...)

Muy distinta es la vía seguida a partir de 1970 por los americanos R. Boyer y J. Moore, primero en la Universidad de Edimburgo, después en Stanford y, por fin, en Texas. Su propósito no era como hasta entonces la comprobación o refutación de conjeturas indemostradas, sino la creación de un instrumento práctico que facilitase el descubrimiento de nuevos teoremas. El principio consiste en proporcionar a la máquina todas las informaciones necesarias para la demostración (los axiomas del sistema y las propiedades que de él se deducen) y facilitarles después el teorema. El ordenador sintetiza por sí solo la demostración de validez.

Tal procedimiento permitió redemostrar informáticamente, a modo de ensayo, ciertos teoremas ya conocidos, como el teorema fundamental de la aritmética (todo número entero es representable de forma única como producto de potencias de números primos) o el teorema de Wilson (si p es primo, el número $(p-1)! + 1$ es divisible por p.).

El fallo principal del sistema reside, a juicio de Jean Louis Krivine, de la Universidad de París VII, en la elección de la estrategia de demostración. El matemático, en razón de su cultura y de sus conocimientos, presume en qué dirección debe buscar cuando quiere demostrar una proposición; el ordenador, incapaz de hacer otro tanto, podría estar trabajando durante años sin acertar con una estrategia idónea. Carece, como los sistemas expertos, de la intuición, característica de la reflexión humana. Hay, pues, que guiar a la máquina.

Esto es lo que decidieron hacer los equipos de N. de Bruijn, en Eindhoven (Holanda) y de Mizar, en Polonia, quienes pusieron a punto en sus respectivos países sistemas de verificación de demostraciones matemáticas. En los sistema de este tipo no se le pide al ordenador que descubra la demostración de un teorema; ésta le es proporcionada ya. El ordenador debe ocuparse tan sólo en verificar que es correcta. Además, gran parte del proceso es efectuado por el usuario. Con ayuda del sistema *Automath* de N. de Bruijn, L. Jutting ha comprobado en su integridad el libro de M. Landau sobre los fundamentos del análisis matemático.

a

...010101010101010101010101...

b

1010101010101...

0101010101010...

c

d

...10010101101001...

La barajadura de Gilbreath, demostrada por la informática, consiste en preparar un mazo de cartas de colores alternantes (a), cortar el mazo de manera que los colores de las primeras cartas de cada mitad sean de distinto color (b), y barajar "peinando" las cartas (c). En el mazo obtenido, cada par de cartas sucesivas consta de una roja y de una negra (d).

Las investigaciones actuales se orientan sobre todo a la elaboración de sistemas híbridos, que conjuguen la demostración automática, para efectuar los cálculos sencillos y fastidiosos, con la dirección por el usuario de las operaciones durante la verificación de la prueba. Un sistema versátil de este tipo puede acercarse a la progresiva automatización, siempre que ello sea posible, de ciertas operaciones. Tal ha sido la vía elegida por G. Huet y su equipo del INRIA francés, así como por otros diez equipos europeos agrupados en el seno de una *Basic Research Action* (Acción de investigación básica) en el marco del plan ESPRIT. Estos trabajos aspiran a concebir sistemas capaces tanto de la demostración de teoremas sencillos como de la verificación de programas informáticos. G. Huet ha demostrado también por ordenador la validez de un celebre juego de cartas: la barajadura de Gilbreath.

Es bastante obvio que, a corto plazo, el interés de estas investigaciones reside sobre todo en la verificación de soportes lógicos, sector económico en desarrollo y tarea de la que existe necesidad. G. Huet, por ejemplo, colabora con la Sociedad *Dassault* tanto en la puesta a punto de sistemas de verificación de programas simples como en la formación de ingenieros especialistas. La Sociedad *Matra*, por su parte, ha efectuado recientemente la verificación por ordenador de un sistema de programas para la gestión automática del Metro. Boyer y Moore, padres de la demostración automática, han creado en Texas una empresa propia, *Computer Logic Inc. (CLINC)*. Su primer logro ha sido la verificación a todos los niveles (lenguaje de máquina, ensamblador, compilador) de una CPU (unidad central de procesamiento) ideada por ellos. En el momento presente, la única limitación de la verificación de programas es la impuesta por los costes. La verificación de un programa le lleva varios meses a un ingeniero, que ha de recibir previamente una formación sumamente especializada. La comprobación de sus programas es un lujo que solamente pueden permitirse las más grandes empresas, y eso en el caso de programas de la más alta seguridad, en los que no pueda permitirse ni un solo error. (François Boissier.)

Juegos matemáticos

Ian Stewart

Una historia parcialmente verdadera

A mí mismo me presento: soy el mentiroso profesional Epiménides. O no tanto. En realidad me llamo Germán Abollalotodo, y trabajo en seguros de automóvil. Pero en el Club Paradoja me conocen por Epiménides; allí miento siempre.

El jueves pasado llovió, y por eso llegué tarde. Sócrates y Platón estaban acodados en la barra del bar; a su lado había un personaje bajito y regordete.

"Te presento a Lukasiewicz, nuestro socio más reciente", gorjeó Platón.

"Horripilado de conocerle", dije con disgusto. "Me llamo Zenón."

"Quiere decir que está encantado y que se llama Epiménides", explicóle Sócrates. "Epiménides miente sin cesar."

"No es verdad", protesté. Saqué mi billetera y les enseñé mi tarjeta profesional. "Esta tarjeta no es mía", hice saber, y se la entregué a Lukasiewicz, que leyó en alto una de las caras: *La frase escrita en el otro lado de la tarjeta es verdadera.* Le dio la vuelta, y vio: *La frase escrita en el otro lado de la tarjeta es falsa.*

"Sócrates tiene razón, sin embargo. Siempre digo mentiras", me jacté.

Lukasiewicz me estrechó afectuosamente la mano. "Es un tercio falso que tengo mucho gusto en conocerle; ambos lados de su tarjeta son medio verdaderos."

"Disculpe, ¿cómo ha dicho?"

"Lukasiewicz se interesa por la lógica difusa", explicó Platón.

"En lugar de asignar sólo el valor de verdad 1 a los enunciados verdaderos y el valor 0 a los asertos falsos", terció Lukasiewicz, "acepto semiverdades, con valor, digamos, 0,5, o cuasifalsedades, con valor 0,1; en general, acepto como valor de verdad cualquier número entre 0 y 1."

"¿Qué necesidad tenemos de eso?", pregunté, perplejo.

Lukasiewicz sonrió. "Supongan que afirmo que el presidente del club se parece a Charlie Chaplin. ¿Le parece cierto a usted?"

"¡Desde luego que no!"

"¿Ni siquiera sus pies se parecen?"

"Bueno... no sé si ..."

"Entonces, mi afirmación no es completamente falsa."

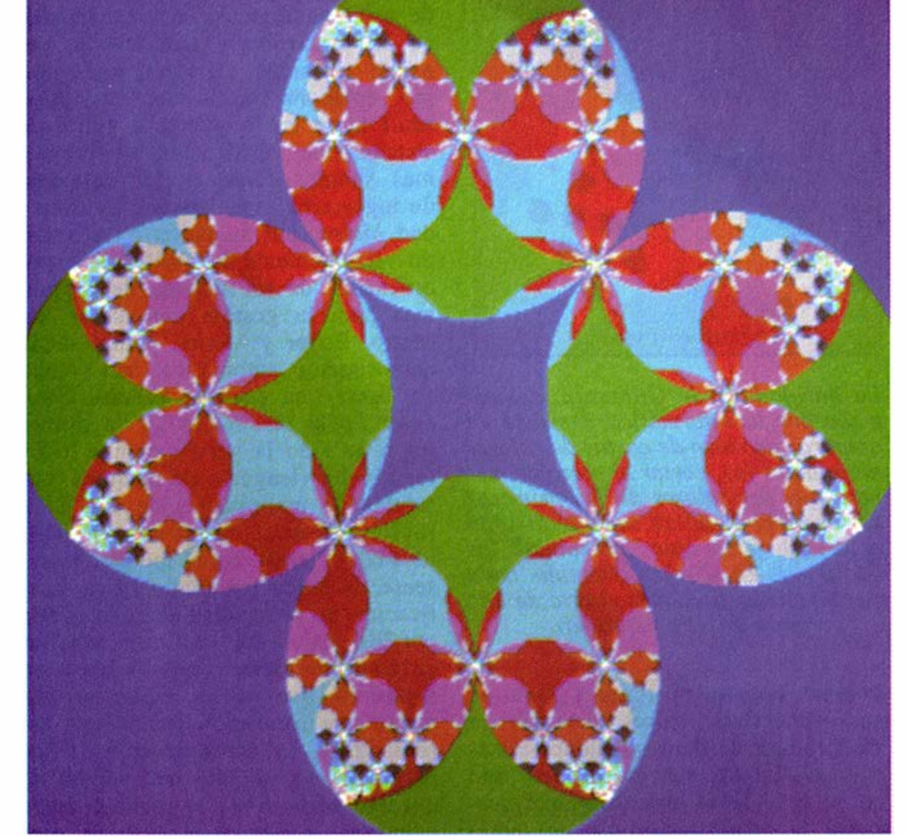
"Vaya, puesto que insiste, un poquito sí se parece a Charlie Chaplin."

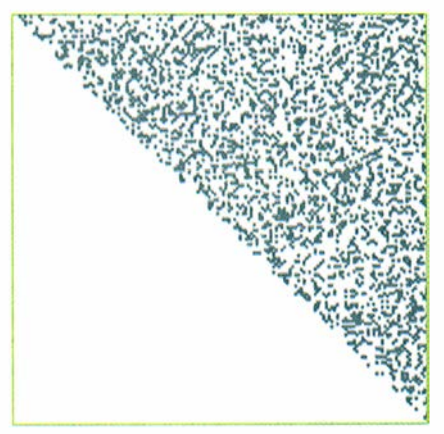
Lukasiewicz se inclinó hacia mí. Su mirada era muy penetrante.

"¿Cuánto diría usted que se le parece?"

"Pues... alrededor de un 15 por ciento, tal vez."

"Muy bien. En ese caso, mi aserto 'El presidente del club se parece a Charlie Chaplin' es un 15 por ciento





1. DIAGRAMAS DE "TIEMPO DE ESCAPE" (izquierda) *y un atractor lógico creados para analizar un enunciado autoalusivo. En lógica clásica, tales enunciados suelen dar origen a paradojas. Las ilustraciones están basadas en la proposición "la estimación de la falsedad de este enunciado no es diferente de la estimación de su verdad".*

verdadero. En lógica difusa, se le asignaría el valor de verdad 0,15."

"Todo eso no es más que un juego de palabras. En realidad no significa nada."

Lukasiewicz me cogió del brazo. "¡Todo lo contrario, tiene perfecto sentido! Además, resuelve paradojas. Usted, por ejemplo, declara ser un perfecto mentiroso. Reflexionemos sobre el enunciado 'Estoy mintiendo', o, más sencillamente, 'Este enunciado es falso'. En lógica clásica es un enunciado paradójico, ¿no es así? De suponerlo verdadero, resulta que es falso; de suponerlo falso, verdadero. Dicho aún de otra forma: se tiene un enunciado P, cuyo valor de verdad es $p = 0$ o $p = 1$, y P afirma que el valor de verdad de esta frase es $1 - p$."

"Lo siento, pero no acabo de entenderle."

"¡Ah! Disculpe. Si P es verdadero, su negación, no-P, es falsa, y su valor de verdad, 0. Y recíprocamente. Ahora, $1 - 0 = 1$ y $1 - 1 = 0$, por lo que si el valor de verdad de P es p, entonces el valor de verdad de no-P es $1 - p$."

"Ya veo."

"Excelente. Ahora bien, el problema consiste en que 'este enunciado' es P, así que P nos está diciendo que el valor de verdad de P es $1 - p$. De ahí nace la paradoja. Si $p = 0$, P nos dice que $p = 1 - 0 = 1$. Y si $p = 1$, entonces P nos dice que $p = 1 - 1 = 0$. Ninguna de las dos opciones es coherente."

Le miré con cierta condescendencia. "Luka, todo lo que has hecho es reformular con lenguaje algebraico y complicado algo evidente ya desde el principio."

Lukasiewicz sonrió con afectación. "Puede ser. Pero en lógica difusa sí tiene solución la ecuación $p = 1 - p$, a saber, $p = 0,5$. Por lo tanto, dices una semiverdad cuando dices que eres un mentiroso; todo funciona perfectamente. Tu propia afirmación conduce inexorablemente a la lógica difusa." Platón le dio palmaditas de felicitación en la espalda, y a Sócrates le entró la risa y casi tiró la copa. Quedé corrido y sonrojado, pero entendí su tesis.

"¿Y qué decir de su tarjeta?", preguntó Platón. Lukasiewicz se dispuso a hablar, pero tercié yo. "Contestaré yo. Tengo dos enunciados, P y Q, con valores de verdad p y q. P dice que Q es verdadero y Q dice que P es falso. Las ecuaciones de sus valores de verdad son, pues

$$p = q \text{ para P}$$
$$q = 1 - p \text{ para Q.}$$

Estas ecuaciones son incompatibles si p y q sólo toman los valores 0 y 1. Pero en lógica difusa admiten solución única: $p = q = 0,5$. Cada cara de mi tarjeta declara una semiverdad, y la paradoja desaparece."

"Sí", refrendó Lukasiewicz. "Pero hay mucho más. Lo que hemos estado explicando son los rudimentos de una nueva teoría de lógica dinámica, ideada por Gary Mar y Patrick Grim, que tiende un puente entre las paradojas semánticas y la teoría del caos."

Esta vez le tocó a Sócrates poner cara de asombro.

"Vamos, despierta. Ya sabes lo que es el caos. Mera dinámica determinista que desemboca en un comportamiento irregular y aparentemente aleatorio. El efecto mariposa. Todo eso."

"¡Claro que lo sé!", protestó Sócrates, molesto. "No, lo que me tiene desconcertado es la noción de lógica dinámica. ¿Cómo puede ser dinámica la lógica?"

Lukasiewicz se alarmaba. "¿Y cómo no, con enunciados autoalusivos, si nos obligan a ir corrigiendo una y otra vez nuestra estimación de su valor de verdad? Tomemos la Paradoja del Mentiroso, ese enunciado que os es tan caro: 'Este enunciado es falso'. Dije antes que la ecuación de su valor de verdad es: $p = 1 - p$. Pero lo que realmente debería haber dicho es que, más que de una ecuación, se trata de un proceso que revisa continuamente la estimación del valor de verdad: $p \leftarrow 1 - p$. Si se supone que P tiene un valor de verdad p, el propio P nos dice que hemos de reemplazarlo por $1 - p$. Por ejemplo, si pensamos que P era verdadero en un 30 por ciento, con lo que $p = 0,3$, la regla de revisión implica que $p = 0,7$, lo que implica a su vez que $p = 0,3$ otra vez... y se obtiene una sucesión infinita de valores de verdad que oscilan periódicamente entre los dos valores 0,3 y 0,7. La paradoja clásica, con $p = 0$ o $p = 1$, conduce a la sucesión 0, 1, 0, 1, ... que refleja fielmente el argumento 'si P es falsa, entonces P es verdadera, por lo que P es falsa, y así...'. La dinámica del valor de verdad capta las oscilaciones lógicas de la paradoja."

"Y $p = 0,5$ es el único valor que no oscila", musitó Platón.

"Sí. Pues bien, la Paradoja Dualista de su tarjeta profesional es en realidad una dinámica lógica:

$$p \leftarrow q$$
$$q \leftarrow 1 - p$$

Supongamos que se estima $p = 0,3$,

Lógica borrosa

En lógica clásica, un enunciado tiene un valor de verdad que es, ora 1 si es verdadero, ora 0 si es falso. El enunciado "Brilla el sol" tiene valor de verdad 0 cuando hay nubes. En general, el enunciado P tiene un valor de verdad igual a 0 o a 1. En la lógica borrosa, o difusa, los enunciados pueden tener un valor de verdad comprendido entre 0 y 1. Si una nube oscurece tres cuartas partes del sol, el enunciado P tiene un valor de verdad de 0,25.

Lo mismo que en lógica clásica, el valor de verdad de un enunciado cambia al serle aplicados los operadores NO, Y, O, IMPLICA y EQUIVALE A.

NO-P tiene valor de verdad $1 - p$.
EJEMPLO: Si el sol está brillando con valor de verdad 0,25, entonces con un valor de verdad de 0,75 el sol NO está brillando.

P Y Q tiene un valor de verdad igual al menor de los valores p y q, siendo éstos los respectivos valores de verdad de los enunciados.
EJEMPLO: El sol brilla con valor de verdad 0,25 Y Juana se broncea con valor de verdad de 0,10.
El valor de verdad del ejemplo es 0,10.

P O Q tiene un valor de verdad igual al mayor de los valores p y q.
EJEMPLO: El sol brilla con valor de verdad 0,25 O Juana se broncea con valor de verdad de 0,10.
El valor de verdad del ejemplo es 0,25.

P IMPLICA Q tiene un valor de verdad que es igual al menor de los números 1 y $1 - p + q$.
EJEMPLO: Si el sol está brillando con valor de verdad de 0,25, entonces Juana se broncea con valor de verdad de 0,10.
El valor de verdad del ejemplo es 0,85

P EQUIVALE A Q tiene un valor de verdad igual a $1 - |p - q|$, esto es, la diferencia entre 1 y el valor absoluto de p menos q.
EJEMPLO: El sol está brillando con un valor de verdad de 0,25 EQUIVALE A que Juana se esté bronceando con valor de verdad de 0,10.
El valor del ejemplo es 0,85.

LA CIENCIA DE ESPAÑA EN INVESTIGACION Y CIENCIA

Algunos de nuestros colaboradores:

Ramón Margalef,
Biología de los embalses

Manuel Losada,
Los distintos tipos de fotosíntesis y su regulación

Antonio Prevosti,
Polimorfismo cromosómico y evolución

Pedro Pascual y Rolf Tarrach,
Monopolos

Antonio García-Bellido,
Compartimentos en el desarrollo de los animales

Manuel García Velarde,
Convección

Juan Barceló y Charlotte Poschenrieder,
Estrés vegetal inducido por metales pesados

Francisco Sánchez,
Luz zodiacal

León Garzón,
Los actínidos

Nicolás García,
Inventores españoles del siglo de oro

Emilio Herrera,
Metabolismo de los glicéridos en el tejido adiposo

A. Ferrer, E. Sanchis y A. Sebastià,
Sistemas de adquisición de datos de alta velocidad

Juan A. Sanmartín,
Física del botafumeiro

Rodolfo Miranda,
Física de superficies

q = 0,8. La primera revisión conduce a p = 0,8, q = 0,7. Una nueva revisión da p = 0,7, q = 0,2, la tercera, p = 0,2, q = 0,3, la cuarta, p = 0,3, q = 0,8, y estamos de vuelta en el punto de partida. El proceso se repite cíclicamente con período 4, a menos que se parta de p = 0,5, q = 0,5."

"Vale", dije. "Pero, ¿y el caos?"

Lukasiewicz se puso muy serio. "Para explicarlo, he de hablar con mucha precisión", dijo. "Si quiere usted experimentar por sí mismo con estas ideas, lo mejor sería que le enseñase a calcular los valores de verdad de los enunciados compuestos en lógica difusa [*véase el recuadro de la página anterior*]. Pero todo lo que realmente necesita saber ahora es que si P tiene el valor de verdad p, su negación, no-P, valdrá $1-p$; eso, y cómo calcular el valor de verdad de enunciados que hablen de enunciados."

"Quisiera tener un ejemplo", dijo Sócrates.

"Platón es buen jugador de golf. ¿En qué medida le parece cierto?"

"Eeuh... en un 40 por ciento", dijo Sócrates. Platón le dedicó una mirada asesina. "No te pongas así; Epiménides suele vencerte, y es bastante mediocre." Mi mirada fue más asesina todavía.

"Llamemos S a ese enunciado y asignémosle el valor de verdad s = 0,4. Supongamos que formulo un enunciado T concerniente a S; por ejemplo, T: 'S es verdadero al cien por cien'. ¿En qué medida es verdadero T?"

Reflexioné un momento. "T no es verdadero al cien por cien, claro. Si lo fuera, S sería verdadero al cien por cien, y partimos de que no lo es."

"Correcto. El grado de veracidad de T, que alude a S, depende del verdadero valor de verdad de S y del que T le atribuye a S. En este caso s = 0,4, pero el valor que T me lleva a estimar es 1. Así pues, el grado de incerteza de T viene dado por la medida en que difieran estos dos valores, ¿no? Cuanto más inexacta sea mi estimación, tanto más falso resulta mi aserto. Dado que ahora difieren en 0,6, T es un 0,6 falso. O sea, 0,4 cierto."

"¿Y si hubiéramos dicho que S es semicierto?"

Lukasiewicz asintió, feliz. "Ya se ha dado cuenta de lo bien que funciona. S estima en 0,5 el valor de verdad de S, pero el valor correcto es 0,4. La diferencia es 0,1, que mide la falsedad del aserto, por lo que su valor de verdad es 0,9. Como su estimación solamente yerra en un 10 por ciento, acierta usted en un 90 por ciento."

"Ah. Y si hubiera dicho que S es cierta en un 40 por ciento, habría acertado en un 100 por ciento. Por lo tanto, el valor de verdad de T habría sido 1. Ya lo he entendido."

"Muy bien. En general, supongamos que tengo un enunciado P con valor de verdad p y un enunciado Q que te lleva a estimar que el valor de verdad de P debe ser p'. El razonamiento que acabamos de hacer dice que el valor de verdad de Q es $q = 1 - |p - p'|$, donde $|x|$ denota el valor absoluto de x. Llamemos 'fórmula de estimación' a esta expresión."

Lukasiewicz reflexionó un momento. "Veamos ahora el enunciado al que llamo el Mentiroso Caótico:

La verdad de este enunciado es igual a la falsedad que se le estima.

Si su valor de verdad es c, el enunciado nos ordena que le asignemos un valor de verdad de $1 - c$. Así, de acuerdo con la fórmula de estimación, su valor de verdad es $1 - |c - (1 - c)| = 1 - |1 - 2c|$. Se define un proceso dinámico

$$c \leftarrow 1 - |1 - 2c|$$

de reevaluación de c. Tomemos un valor inicial arbitrario para c, por ejemplo, c = 0.12345, y vayamos calculando valores sucesivos. Serán caóticos. En realidad, debo advertirle que a causa de los errores de redondeo de su calculadora quizá se estabilice el proceso en 0 o en 1. Para evitarlo, sustituya la dinámica por esta otra

$$c \leftarrow 1 - |0{,}999999 - 2c|.$$

Se dará, incluso, el famoso efecto mariposa de la teoría del caos, a saber, que una mariposa que bate las alas puede provocar un huracán un mes más tarde, o dicho de manera más prosaica: pequeñas modificaciones de las condiciones iniciales pueden producir grandes cambios en la dinámica posterior. Si el valor inicial fuese un poco distinto, 0,12346, por ejemplo, se obtendría una imagen diferente."

Lukasiewicz tomó aliento. "Y he aquí el Dualista Caótico, que consta de dos enunciados:

X: X es tan verdadero como es verdadero Y

Y: Y es tan verdadero como X es falso

Se parece bastante a su tarjeta, Epiménides. Sus dinámicas son

$$x \leftarrow 1 - |x - y|$$

$$y \leftarrow 1 - |y - (1 - x)|.$$

Para ver qué hace, tomas una pareja de valores iniciales, por ejemplo, $(x, y) = (0{,}2,\ 0{,}9)$ y vas calculando sucesivos pares de valores. Los tratas como si fuesen coordenadas, y los representas. Se obtiene una figura que se denomina atractor del sistema dinámico, en este caso un triángulo densamente relleno de puntos. Esta representación puede transformarse en una imagen muy bella e intrincada, el llamado diagrama de tiempo de escape. Para crearlo, prescindamos de la condición de que x e y hayan de encontrarse entre 0 y 1. La idea consiste en observar cuánto se aleja (x, y) del origen y en contar cuántos pasos de cómputo se requieren antes de que (x, y) rebase cierto valor umbral. El color con que se dibuje el punto (x, y) es función de ese número de pasos. Para empezar, lo mejor sería tantear con un valor umbral que fuese apenas mayor que 1."

"Ahora empiezo a entenderlo", dijo Sócrates. "Se convierte la cadena de razonamientos empleados para evaluar el valor de verdad de un sistema de enunciados autoalusivos en un proceso dinámico. Aplicamos después las técnicas de la teoría del caos a tal proceso. La gráfica "tiempo de escape" se inspira en el mismo procedimiento que crea las maravillosas imágenes asociadas con el conjunto de Mandelbrot: volutas espirales, caballitos de mar, cactus, estrellas y demás."

"Efectivamente. He aquí una última idea para que le deis vueltas. Podemos reformular el Mentiroso Caótico como sigue:

La estimación de la falsedad de este enunciado no es diferente de la estimación de su verdad.

'Muy', en lógica difusa, viene a equivaler a elevar al cuadrado un valor de verdad. Pensemos pues en este enunciado más fofo:

La estimación de la falsedad de este enunciado no es muy diferente de la estimación de su verdad.

Su dinámica es

$$p \leftarrow 1 - (p - (1 - p))^2,$$

que, simplificada, se convierte en

$$p \leftarrow 4p(1 - p)$$

Los especialistas en teoría del caos denominan a esto "sistema dinámico logístico"..., así que mi enunciado es el Mentiroso Logístico. También es caótico. Podéis comprobarlo."

El Club Paradoja cerró a medianoche; Lukasiewicz y yo salimos a la calle. Me di cuenta de que había estado tan absorto calculando ejemplos de caos lógico-difuso que se me había olvidado hacerle una pregunta muy importante. "Luka, todo esto es de lo más bonito, pero ¿para qué sirve?"

"Verás. Mar y Grim señalan que proporciona una vía geométrica a la complejidad semántica, permitiéndonos así distinguir entre diferentes sistemas de enunciados autoalusivos. Afirman asimismo que puede servir para demostrar la inexistencia de un procedimiento de decisión que nos diga si un sistema dado es caótico o no. Este último resultado está en la misma línea general que el famoso teorema de Kurt Gödel sobre la indecidibilidad de la aritmética. Epiménides, es muy posible que estemos tocando materias de gran profundidad."

"Ya veo, ya. Conexiones entre la lógica y el caos... ¡Pasmoso! Pero... un momento. ¿Cómo puedo estar seguro de que todo cuanto me has contado es cierto?"

"Si en algo he mentido, quieran los dioses que caigan sobre mí dos rayos y me fulminen ahora mismo."

Justo entonces se formaron en el cielo gruesos nubarrones de tormenta y un rayo vaporizó a Lukasiewicz, enviándolo al país de nunca jamás. Alcé la mirada al cielo y amenacé a las nubes con el puño. "Así pues, ¿me estaba hablando con toda verdad, o sólo a medias?"

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DOES GOD PLAY DICE? THE MATHEMATICS OF CHAOS. Ian Stewart. Basil Blackwell, 1990.

PATTERN AND CHAOS: NEW IMAGES IN THE SEMANTICS OF PARADOX. Gary Mar y Patrick Grim en *Noûs*, vol. 25, n.º 5, págs. 659-693, diciembre de 1991.

SELF-REFERENCE AND CHAOS IN FUZZY LOGIC: RESEARCH REPORT #92-01. Patrick Grim. Grupo de Lógica y Semántica Formal, Departamento de Filosofía, S.U.N.Y., Stony Brook, 1992.

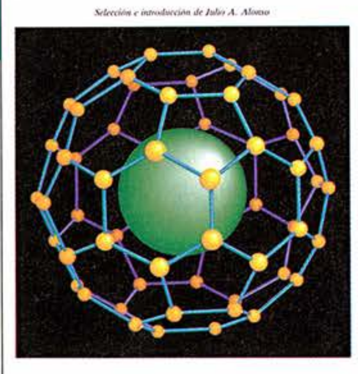
COMPUTER INVESTIGATIONS IN THE SEMANTICS OF PARADOX: CHAOTIC LIARS, FRACTALS, AND STRANGE ATTRACTORS. Gary Mar y Patrick Grim en *Philosophy and Computing* (en prensa).

NOVEDAD

LIBROS DE INVESTIGACION Y CIENCIA

FISICA DEL ESTADO SOLIDO

Selección e introducción de Julio A. Alonso



- AVANCES EN SEMICONDUCTORES DE ARSENIURO DE GALIO, Marc H. Brodsky
- ELECTRONES BALISTICOS EN SEMICONDUCTORES, Mordehai Heiblum y Lester F. Eastman
- EL DISPOSITIVO DE EFECTO CUANTICO, ¿TRANSISTOR DEL MAÑANA?, Robert T. Bate
- EL EFECTO HALL CUANTICO, Klaus von Klitzing
- APLICACIONES DEL EFECTO HALL CUANTICO, Bertrand I. Halperin
- CUASICRISTALES, David R. Nelson
- ESTRUCTURA DE LOS CUASICRISTALES, Peter W. Stephens y Alan I. Goldman
- VIDRIOS DE ESPINES, Daniel L. Stein
- SUPERCONDUCTORES ALLENDE EL 1-2-3, Robert J. Cava
- PEROVSKITAS, Robert M. Hazen
- TRANSICIONES DE FASE EN LAS PEROVSKITAS, Juan Bartolomé Sanjoaquín y Rafael Navarro Linares
- MICROAGREGADOS, Michael A. Duncan y Dennis H. Rouvray
- PROPIEDADES DE LOS MICROAGREGADOS METALICOS, M. Pilar Iñiguez y Julio A. Alonso
- FULLERENOS, Robert F. Curl y Richard F. Smalley

Libros

L. Carbonell, M. J. Báguena, J.-Lluís Pretus y J.-D. Ros, Luis Alonso y J. L. Amorós

Cartografía militar

Plazas españolas

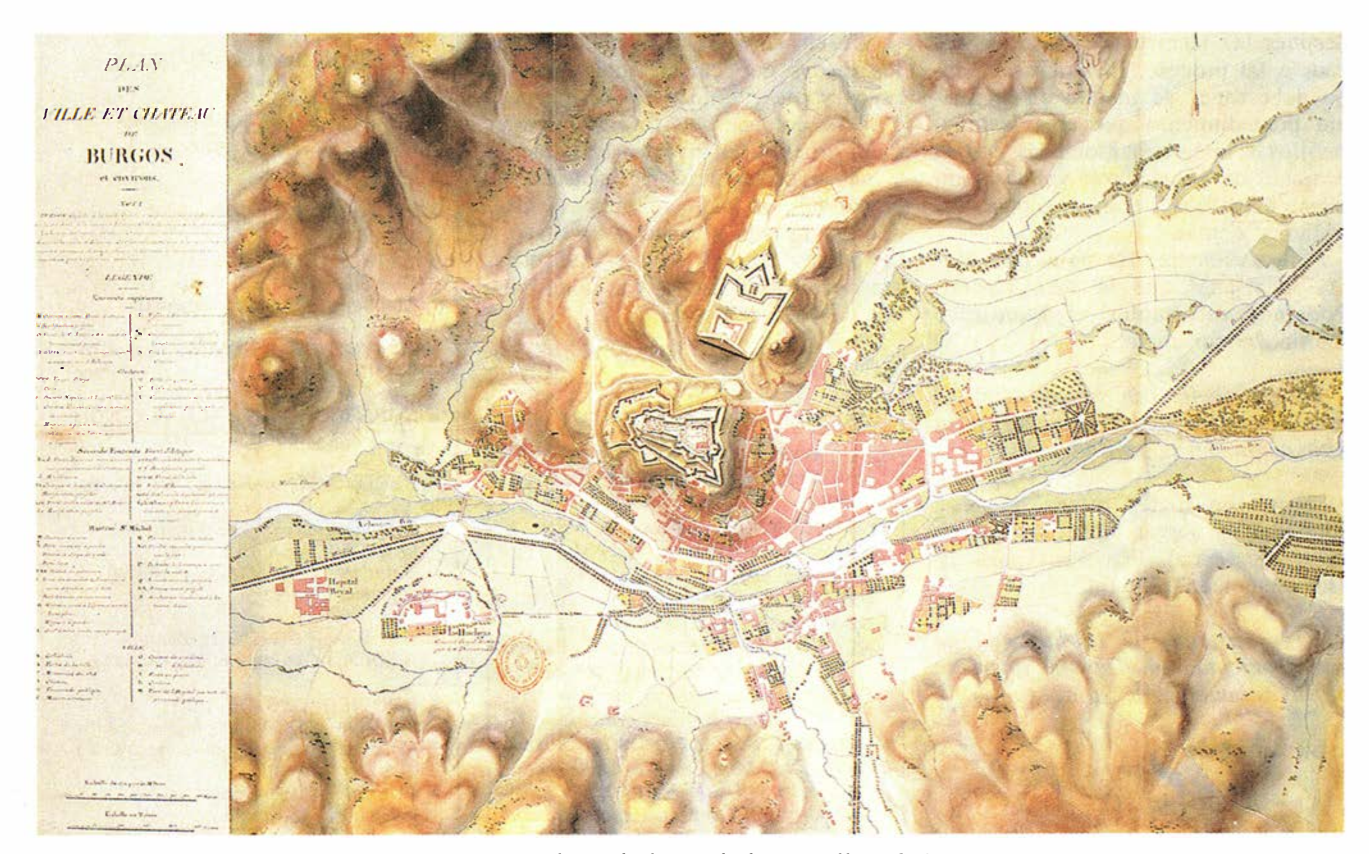
Cartografía militar de plazas fuertes y ciudades españolas. Siglos XVII-XIX: Planos del archivo militar francés, por A. Bonet Correa. Instituto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales; Madrid, 1991.

Bella y lujosa publicación, en cuya presentación Dionisio Hernández Gil destaca las numerosas reproducciones de planos de ciudades y núcleos urbanos de nuestro país, cuyos originales fueron reunidos en su día por cuestiones de interés militar y constituyen unas referencias gráficas de gran fidelidad, para conocer la disposición de aquellos lugares en el pasado y la transformación que han experimentado hasta hoy.

Bonet explica que la colección se originó para dotar al ejército francés de los elementos necesarios para el conocimiento de las defensas y fortificaciones existentes en los demás países, y en particular en los fronterizos, siguiendo un criterio establecido ya en la antigüedad y cuyos precedentes se encuentran en el propio Alejandro Magno. Así, señala que los primeros ejemplares de la serie que nos ocupa son copia de los planos originales españoles a los que tuvieron acceso los franceses y a los cuales añadieron, con el tiempo, los obtenidos como botín de guerra.

Se detiene en la evolución del cuerpo de ingenieros militares franceses, creado por Vauban en 1691, y la incidencia de la fundación de la Ecôle Du Génie de Mézières en 1748-1751, que dio un gran impulso a la cartografía militar del país. Paralelamente a ello analiza también los progresos realizados en materia de fortificación, como consecuencia del incremento de la eficacia de la artillería, con la sustitución de los bolaños de piedra por proyectiles metálicos más destructivos, que obligaron a construir un nuevo tipo de fortalezas dotadas de baluartes, siendo Verona la primera en edificar una de estas características en 1527, cuya eficacia tendría ocasión de demostrar Viena, en ocasión del asedio turco de 1683. De todos modos, el papel de las fortalezas empezó a declinar a fines del siglo XVIII, cuando el ejército prusiano impuso la táctica ofensiva del ataque simultáneo a distintos lugares fuera de la cobertura de tales instalaciones, con el empleo de ejércitos ligeros y de gran movilidad.

El autor dedica apartados a reflejar la preocupación de la corona española por la formación del personal militar y la consiguiente creación de la Academia de Matemáticas y Arquitectura Civil y Militar en Madrid, en 1582. Posteriormente, en 1710, un año antes de la fundación de la Real Academia de Matemáticas de



Burgos, plano de la ciudad y castillo, 1812.

Barcelona, tuvo lugar la creación del Real Cuerpo de Ingenieros Militares, cuya misión quedó definida por una Real Orden de 1718. En 1803 la enseñanza de la ingeniería militar pasó a la Academia de Ingenieros de Alcalá de Henares, donde permaneció hasta el año 1833 en que fue trasladada a Guadalajara. Un poco antes, en 1810, se creó el Cuerpo de Estado Mayor y el Depósito de la Guerra, que puso los cimientos de las colecciones de cartografía militar hoy existentes en el Servicio Histórico Militar y en el Servicio Cartográfico del Ejército.

El capítulo titulado *Inventario* relaciona los planos españoles que se conservan en el castillo de Vincennes, seguido de un apartado similar dedicado a los existentes en el archivo de la rue Bellechasse, de París, donde se encuentra el Atlas Missé, cuyo contenido detalla. En *Planos* reproduce 266 de ellos a todo color. La obra termina con un índice de todas las ilustraciones. (L. C.)

Patología molecular

Años de formación

LE CLINICIEN ET LE CHERCHEUR. DES GRANDES MALADIES DE CARENCE À LA MÉDECINE MOLÉCULAIRE (1880-1980), por Christiane Sinding. Presses Universitaires de France, París, 1991.

Christiane Sinding, pediatra y diplomada en historia de la ciencia, aúna la práctica clínica en el Hospital Necker de Enfermedades Infantiles, de París, con la investigación histórica de las ciencias biomédicas en el Instituto Nacional francés de la Salud y de la Investigación Médica.

La obra consta de una introducción y siete capítulos bajo los epígrafes siguientes: una solución biológica para una enfermedad de la civilización; una rebelión del organismo; un campo fértil, pero sospechoso; las plumas del gallo; definir al individuo; el estilo inimitable de Fuller Albright; hacia el concepto de receptor endocrino. La autora añade un capítulo de conclusiones, una extensa bibliografía tanto de fuentes como secundaria que se completa con una lista de las revistas médicas citadas, un glosario de términos biomédicos y un índice biográfico. Se ha excluido un anexo con el árbol genealógico de los raquitismos resistentes, que recoge las entidades nosológicas conocidas hasta 1990.

Sinding parte de la lectura de dos artículos de un mismo autor, Fuller Albright, y rastrea las condiciones que intervinieron en su gestación, con el fin de reconstruir su discurso científico. A su vez, busca ubicar el artículo "original" en la ciencia moderna, tarea compleja repleta de pistas falsas.

El raquitismo resistente a la vitamina D es el problema debatido en el primer trabajo de Albright, aparecido en 1937. Ausente todavía una formulación clara de las posibles causas de esta alteración, el autor apuntó la existencia de un antifactor o antivitamina, siguiendo los paradigmas nutricionales y endocrinológicos de su tiempo. Sinding recorre el camino seguido por Albright para llegar a la descripción de este nuevo cuadro patológico a través de los textos escritos con anterioridad a la aparición de este artículo. Encuentra en ellos como explicación de la resistencia al tratamiento una "tendencia al raquitismo" o una "sensibilidad variable al tratamiento". Se hace patente aquí la idea de "constitución" o "terreno", de prolongada vigencia en medicina y fundamentada en la época sobre las diferencias individuales existentes entre los organismos a causa de su distinta composición química. Por ello, el organismo "resistente" a la vitamina D lo sería por un "error" en la construcción del mismo. Aunque en la actualidad la enfermedad descrita por Albright en 1937 no se considera una resistencia "verdadera" a la vitamina D, todos los signos clínicos y radiológicos encontrados en su época llevaban a esa conclusión.

El segundo artículo de Albright fue escrito en 1942 y presentó un cuadro morboso conocido como pseudohipoparatiroidismo. También en él se observaba una "resistencia" del órgano diana, las paratiroides, a la acción de la hormona paratiroidea. Sinding ofrece el contexto de este trabajo presentando el concepto de secreción interna y de regulación hormonal, el cual permite mantener al organismo la constancia de su medio interno. La observación de Albright abrió un campo nuevo en la investigación endocrinológica en un intento de explicar esta "resistencia". Al principio se recurrió a la vieja corriente constitucionalista, valorando la diversidad de respuestas a las hormonas en función de la "constitución" de los individuos o de los órganos implicados. Poco después, surgió con fuerza el concepto de error innato del metabolismo, clave en la historia del raquitismo resistente y de otras enfermedades hereditarias.

Como tercera solución al problema de las variaciones individuales de la respuesta hormonal se aludió a la posible existencia de antihormonas, sustancias interceptoras de las hormonas en su trayecto desde las glándulas a los órganos diana. Esta idea se enmarca dentro de la tendencia propia de comienzos del siglo XIX de considerar el equilibrio orgánico como resultado de un juego de factores antagónicos. Desde 1940 quedó demostrado que el "efecto antihormona" observado era producido en realidad por anticuerpos resultantes de la administración de hormonas exógenas y no por sustancias fisiológicas.

A lo largo de toda la obra queda clara la trayectoria de Albright, perfilada a través de sus trabajos científicos, sus reflexiones metodológicas y epistemológicas y los testimonios de sus contemporáneos. Su concepción de la medicina como una ciencia fundada en la medida y el método experimental se manifiesta en sus escritos, modelo de razonamiento sobrio y riguroso. (M. J. B.)

Ecología

Clásico para todos

PLANETA AZUL, PLANETA VERDE, por Ramón Margalef. Prensa Científica; Barcelona, 1992.

Ramón Margalef es un autor prolífico, y entre su producción, dominada mayoritariamente por artículos y libros técnicos, abundan también los textos de alta divulgación científica. En ellos, sus amplios conocimientos de naturalista de la vieja escuela y de ecólogo fundador de una de las nuevas se amalgaman con una sorprendente capacidad didáctica y literaria rara entre nosotros.

Si la ciencia es una descripción abreviada de la realidad, *Planeta azul, planeta verde* es una descripción científica de la biosfera. ¿Qué esperaría encontrar el lector en el índice de un libro que abordara tal tema? El número de aproximaciones posibles podría desconcertarle. ¿Qué describir, las especies interactuantes, con sus diferentes estilos de ciclos biológicos, demografía, comportamientos, fisiología adaptativa e interacciones tróficas; es decir, la clasificación ecológica de sus componentes? ¿O más bien tratar las formaciones climáticas y los grandes biomas, con

sus detalles biogeográficos? ¿O quizá, con una aproximación reduccionista extrema, partir de los átomos y tratar de desvelar el rompecabezas de los ciclos de los elementos en la biosfera?

Todos estos enfoques pertenecen genuinamente a la ecología, ciencia, se nos dice, que se ocupa de la biofísica de los ecosistemas. Por ello, Margalef aborda conjuntamente todas estas disciplinas, e incide en los aspectos energéticos (regulación térmica del planeta, producción y descomposición de materia viva), materiales (devenir de los nutrientes en mares, ríos y continentes) o los que con base física afectan a la memoria del planeta, ya sea ésta genética, cultural o expresada en distintos soportes materiales reconocibles. El autor asume una descripción funcional de la biosfera, que huye de los apriorismos. Después de todo, lo asombroso es que la pluviselva tropical y el arrecife de coral, ejemplos cumbre de biodiversidad, se originaran y persistieran en un planeta por cuyo futuro, cuando se hallaba en su primera juventud química, nadie en sus cabales hubiera apostado.

La ciencia que hoy reconocemos tomó su camino en busca de leyes breves y universales sobre el movimiento, la materia y sus estados. Después se examinaron las leyes por las que aquel movimiento no tomaba ciertas direcciones, se descubrió el código de circulación termodinámica del universo y, con él, la flecha del tiempo. En la actualidad, frente a fenómenos más variados, debe abrirse paso ante lo complejo, lo histórico y lo irrepetible. Leyes termodinámicas rigen el destino de lo grande, mientras dejan en libertad las jerarquías menores. La vida ha creado estructuras que canalizan la degradación de energía de alta calidad hasta que se convierte en otra de menor calidad, el calor. Amparados así en el mundo de lo miniaturizado, los mecanismos de la evolución orgánica resultaron ideales para capitalizar, en forma de especies biológicas, los cambios de todo tipo en la superficie terrestre. Hoy día persiste el registro de lo viviente, además de un entorno que no sólo ha cambiado desde los orígenes, sino que lo ha hecho en buena parte debido a la actividad biológica de los ecosistemas que, como los ambientes acuáticos eutróficos, acumulan materiales en los sedimentos (que más tarde los agentes geodinámicos se encargan de poner a la vista) o bien los liberan a la atmósfera, modificando así su composición.

Esta es la perspectiva que el lector contempla al asomarse a los esquemas que Margalef va desarrollando al explicar la biosfera. Se evalúan los procesos y entidades que permiten a los sistemas biológicos producir biomasa y que están ensamblados en sistemas disipativos de los que dependen precisamente por la cantidad de energía (exosomática) cambiada. Remolinos atmosféricos y giros oceánicos disipan su energía, mientras el río mundial vierte (o invierte) en el océano minerales, solutos y materiales orgánicos poco reciclables. Desde las profundidades marinas, potentes masas de agua ascienden frente a las costas desoladas de ciertas latitudes, fertilizando la tenue capa fótica que mantiene la vida en el espesor del gran océano.

Un tema recurrente y preferido del autor es la ausencia de ciclos perfectos en la naturaleza. Margalef intenta alejar la ecología de la física que precedió a la aparición de mecanismos de relojería y muñecas articuladas del siglo XVIII, incompatibles con la gran explosión y la evolución del universo. La irrepetibilidad es un rasgo fundamental de los sistemas vivos, siempre en continuo cambio. La componente histórica y la asimetría de los cambios en el tiempo encuentran su expresión en la teoría de la sucesión ecológica.

Los efectos de la actividad humana en la naturaleza se insertan en esquemas funcionales globales del planeta. El hombre maximiza ciertos procedimientos ya aparecidos en otros organismos o sistemas: fabricación de productos no biodegradables, vocación heterotrófica de los ríos, evolución de la guerra química en la naturaleza (llamada *mitriádica* por el autor), son algunos ejemplos. Margalef entiende el impacto humano como un agravamiento numérico de estos y otros procesos. Pero otras actividades humanas son desarticuladas desde su base, como la pesca de ciertas especies depredadoras de cadenas tróficas largas, o parte de la acuicultura moderna, sin base en la producción primaria. Margalef sitúa así los conflictos ecológicos del hombre con la biosfera en el marco de la teoría ecológica; explica, más que propone, y plantea perspectivas que pueden resultar chocantes, pero que tienen una base ecológica sólida, a diferencia de lo que subyace a buena parte del discurso ambientalista.

El último capítulo tiene el tiempo como eje fundamental. El autor propone el uso del espectro de perturbaciones. Existe una relación inversa entre la intensidad de dichas perturbaciones y su frecuencia (desde la gran explosión a los cambios diarios día-noche, pasando por sequías, caí-



Fragmento de un tapiz del siglo XVI, en el que un anciano encadenado parece estudiar unas conchas, ajeno al fragor de la batalla, imagen estereotipada del naturalista encerrado en su torre de marfil.

da de árboles viejos, terremotos, secuencia de estaciones, incendios, impactos meteoríticos, etc.). El hombre introduce en la naturaleza nuevas perturbaciones, algunas asimilables, otras no. Por su imprevisibilidad, no todas ellas pueden ser internalizadas por organismos y comunidades.

Si un espectro similar al de perturbaciones se aplica a los libros de temática ecológica, *Planeta azul, planeta verde* se coloca automáticamente en un extremo del mismo, el de los textos de baja frecuencia y elevado interés y carisma, capaces de reorganizar nuestras ideas sobre el funcionamiento de la biosfera, en contraposición a la abundancia de libros de interés más bien reducido que no aportan realmente nada nuevo a la descripción ecológica del mundo en que vivimos y a nuestro papel en el mismo.

La diversidad del lenguaje de Margalef se sitúa cerca del límite superior, pues su léxico es riquísimo y su narrativa es ágil y agradable. El autor utiliza con frecuencia el ejemplo y la analogía para ilustrar sus proposiciones. Muchos detalles, al estilo de los viejos textos de historia natural, harán las delicias del lector, quien se siente continuamente invitado a sacar sus propias deducciones, estimulado por la aparente sencillez de los planteamientos. Margalef emplea la analogía como motor sugestivo de nuevas aproximaciones a viejos problemas, o como hipótesis de trabajo para que los últimos hallazgos científicos encajen en el conjunto; materializa así la conveniencia popperiana de saber desenvolverse entre el juego o la osadía y la contrastación permanente, como si de una selección natural de índole cultural se tratara.

El libro forma parte de la magnífica colección Biblioteca Scientific American, de la que constituye la primera aportación original, no traducida. Su calidad editorial es superior a la media de este tipo de textos. (J.-Ll. P. y J.-D. R.)

Ciencia de la Ilustración

Teoría y práctica

SCIENCE AS PUBLIC CULTURE. CHEMISTRY AND ENLIGHTENMENT IN BRITAIN, 1760-1820, por Jan Golinski. Cambridge University Press, 1992.

BRITISH MEDICINE IN AN AGE OF REFORM. Dirigido por Roger French y Andrew Wear. Routledge; Londres, 1991.

JAMES HUTTON AND THE HISTORY OF GEOLOGY, por Dennis R. Dean. Cornell University Press; Ithaca, 1992.

GOETHE'S HISTORY OF SCIENCE, por Karl J. Fink. Cambridge University Press, 1991.

Igualaba Kant la Ilustración a la pérdida del miedo a usar la inteligencia, a la huida del hombre del estado de minoría de edad en que ese temor le encadenaba. Kant apuntaba, sobre todo, a la ilustración científica, la que respiraba Europa entera en el último tercio del siglo XVIII y primero del siguiente. Ese movimiento venía impulsado por una clase media ascendente con afán de saber y por una orientación de éste hacia el campo de los fenómenos susceptibles de ser controlados y provocados. El estudio del calor, de la pneumática e incluso de la electricidad se vio así privilegiado. Pero, sobre todo, el de la química naciente, porque, entre otras razones, en la nueva disciplina hallaban su razón de ser y su aplicación práctica.

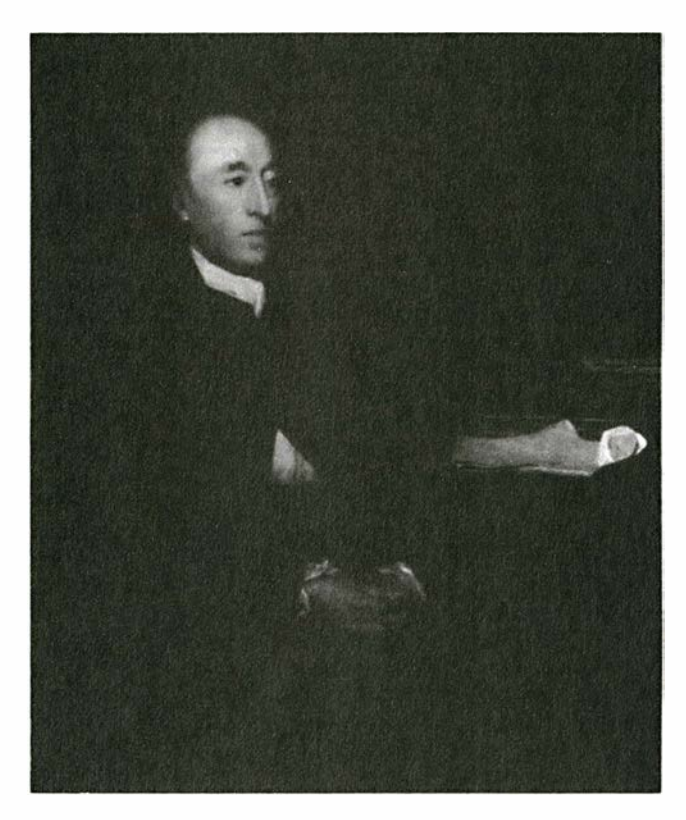
La química no se circunscribía a Lavoisier, por más que sólo en referencia a la escuela francesa —adheriéndose a ella o negándola— pudo avanzar. Tuvo un arranque brioso en la Escocia de mediados del XVIII (William Cullen y James Black), que heredará en las décadas siguientes Gran Bretaña, y ésta prolongará su influencia hasta el despegue alemán de los años centrales de la centuria siguiente. Golinski estudia en *Science as public culture* ese período haciendo parada y fonda en las principales figuras y en la participación del público en la aceptación o rechazo de ideas y experimentos.

De William Cullen (1710-1790) puede decirse que puso la química en el camino real de la ciencia. El trabajo artesanal de Boyle y la enseñanza subsidiaria de la medicina que se impartía desde la cátedra de Edimburgo, creada ya en 1713, los transformó en una articulación sistemática de nociones y principios. "Los componentes de los cuerpos son físicos, también llamados átomos, y químicos"; el análisis se resolvía en los principios químicos, la división en principios físicos. De manera particular, investigó el papel del calor en los cambios químicos e incluyó éstos en un marco teórico que arrancaba de la idea newtoniana del éter. Arrumbó, en lo posible, la jerga ininteligible que rodeaba procesos no menos obscuros y clasificó ácidos y álcalis, amén de identificar nuevos compuestos.

El legado de Cullen lo recogió su alumno Joseph Black (1728-1799), quien le sucedió en la cátedra de Edimburgo, diluida aquí su figura por la atención obsesiva del autor hacia el contexto social. Black ha pasado a la historia de la química con la descripción troquelada de Hélène Metzger: "Conocido por su teoría sobre el calor específico y calor latente, descubrió el dióxido de carbono, al que llamó 'aire fijo'. Echó los cimientos de la química como ciencia exacta en sus trabajos sobre el carbonato magnésico."

Consagra dos capítulos largos, el tercero y el cuarto, a Joseph Priestley (1733-1804), símbolo del tránsito de la química escocesa a la inglesa, aunque él mismo personaje heterodoxo y crítico hasta la exasperación de la ciencia oficial representada por el entorno de la Regia Sociedad londinense. Llegó a la química desde una formación humanística y filosófica, y no desde la carrera médica como era lo habitual; carecía, pues, de prejuicios de casta, talante avivado con sus simpatías por la revolución francesa; se propuso poner la química al alcance de todos buscando la sencillez del experimento y, sobre todo, las posibilidades de repetirlo sin instrumentos complejos; dirigió las nuevas ideas sobre la electricidad, la visión y los gases hacia una aplicación práctica, médica inclusive. Golinski deja para otros el hilván de su labor inquisidora (descomposición eléctrica del amonio, aislamiento del óxido nitroso, sulfhídrico, monóxido de carbono, oxígeno y otros) para ilustrar con un derroche de detalles la vida real, y también la oficial, de los grupos (la Sociedad Lunar de Birmingham, las universidades de Oxford y Cambridge) que seguían con contradictorio interés lo mismo sus elegantes explicaciones de laboratorio que sus soflamas políticas.

El autor se extiende en las razones por las que los priestleyanos ingleses se opusieron, en un principio, a la innovación lavoisierana. Negábanle que hablara de hechos comprobados y ponían en cuestión la fiabilidad de sus instrumentos (balanzas y calorímetros), la validez de su método (que al desechar el flogisto y, por ende, la teoría de la combustión y la calcinación a él asociada obligaba a replantear la concepción de la acidez, la respiración y la composición química) y su terminología. Actitud que cambió con Thomas Beddoes (1760-1808) y su protegido Humphry Davy (1778-1829). La narración alcanza, a propósito de estos dos últimos, su máxima tensión, en particu-



James Hutton, en un retrato realizado por Henry Raebun.



Johan Wolfang von Goethe, a sus 51 años.

lar cuando aborda el episodio del gas hilarante en el caso del primero y desgrana los logros obenidos por Davy con su aplicación sistemática de la electrólisis.

Beddoes, nos cuenta Roger French en *British Medicine in an age of Reform*, llevó también el espíritu ilustrado a la renovación de la praxis médica. Había que reformar, no sólo la profesión mediante el robustecimiento de la enseñanza académica obligada, sino también al paciente desde la infancia a través de un conocimiento mejor de su propio cuerpo. La propia sociedad mercantilista de finales del siglo XVIII, blandengue y pendiente de la última moda, obsesionada por la riqueza hasta la explotación de jóvenes y débiles, necesitaba una catártica metaformosis. Los avances técnicos y la ciencia ilustrada no constituían ninguna panacea: persistían las viejas enfermedades (escarlatina) o incluso cobraban un vigor inusitado (tuberculosis). Era mejor prevenir que curar.

Fenómeno común de la Ilustración europea fue la institucionalización académica de los distintos grupos que tenían que ver con la salud; de los médicos a las parteras, pasando por cirujanos, algebristas, boticarios y herbolarios. Brotaron así por doquier órdenes de unificación (médicos y cirujanos o albéitares y veterinarios en España, por ejemplo) y reglamentación de los estudios para sacar del albur la miríada de empíricos que, en provincias sobre todo, ejercían sin control el oficio de sanar. En el mejor de los casos, al boticario o al barbero le bastaba haber pasado algunos años de aprendizaje con otro maestro, cuya idoneidad se daba por supuesta. En Inglaterra el salto se dio con el Acta de los Apotecarios, de 1815, que reglamentaba la formación necesaria para recibir el título capacitador y que incluía cursos de anatomía, patología, química y materia médica. Susan C. Lawrence pormenoriza los antecedentes y el período de tránsito entre el establecimiento de la norma y el definitivo control médico de los boticarios, con connotaciones que fácilmente recordará el lector español, verbigracia, la convalidación directa de los procedentes de los cuerpos militares.

Otro rasgo de la ilustración médica fue la implantación de la historia clínica, con el abandono de la explicación del paciente, imprecisa y dialectal, por la nosología de Cullen y la denominación técnica de los procesos morbosos. Mary E. Fisell extrae de relatos de la época ese cambio y subraya la medicalización creciente de los hospitales, hasta entonces centros de beneficencia para remedio de los insolventes. La profesionalización de esos centros se espejó en el modelo del Hôtel-Dieu de Lyon, a donde acudieron los médicos escoceses. John Harley Warner generaliza el fenómeno a través de un ensayo sobre la atracción que la medicina francesa, París en particular, ejercía sobre la juventud, para insistir en otra nota característica de la ilustración, el sentimiento regeneracionista que cargaba las tintas en el atraso del tejido médico inglés y sobrevaloraba lo que se producía al otro lado del Canal.

La Ilustración escocesa trocó en ciencia el coleccionismo de minerales, a que se reducía el conocimiento de los componentes de la corteza terrestre, viene a decir Dennis R. Dean en *James Hutton and the History of Geology*. Desentraña el pesado alumbramiento de la geología moderna mediante el análisis interno de la evolución de la teoría de la Tierra en los escritos del creador del uniformitarismo, expurgándolo de las interpretaciones incompletas de John Playfair y Charles Lyell, sus dos hermeneutas clásicos del primer y segundo tercio del siglo XIX, respectivamente.

James Hutton (1726-1797) pertenecía al círculo de Black en Edimburgo. Alcanzó una buena formación química en París y se doctoró en medicina en Leiden con una tesis sobre la circulación de la sangre, que sabría aprovechar para su visión de las entrañas de la Tierra. Atribuía la formación de las rocas a un pro-

ceso externo de sedimentación y otro interno de consolidación por efecto de la presión y el calor; la erosión, por un lado, y las fuerzas volcánicas, por otro, explicaban la orografía del suelo.

Fundaba sus juicios en la observación directa de cuantos accidentes, cortes o cuevas pudo visitar durante muchos años y en el estudio de los minerales que recogía o le enviaban, así como en el juicio crítico de lo expuesto por sus contemporáneos sobre la formación de los Alpes y los Pirineos y la estructura de los volcanes alemanes y el Vesubio. Dean recorre los refinamientos de su idea central desde los ensayos de 1785 hasta su obra definitiva, *Theory of Earth*, de diez años más tarde.

Alérgico a las doctrinas catastrofistas, postulaba el carácter cíclico de los episodios de hundimiento y elevación de las montañas y se convirtió en adelantado del abandono de la interpretación literal del relato del Diluvio, del que hacía una lectura simbólica. Sus puntos de vista tardarían mucho tiempo en aceptarse en el continente. (En España no parece que se conociera de primera mano su pensamiento, sino que llegó retorcido por las ideas antagónicas de su detractor Kirwan, traducido éste al alemán y resumido luego en castellano por Christiano Herrgen en *Descripción geognóstica de las rocas.)*

Resalta Karl J. Fink, en *Goethe's History of Science*, la admiración que guardaba el alemán por el movimiento social británico a favor de la ciencia, representado por sociedades y academias. En su comienzo, aunque sólo entonces, la Ilustración alemana imitó efectivamente las maneras de Inglaterra y Francia. Pero ni siquiera al más extranjerizante de todos, a Goethe, puede negársele el sello característico germano de dicha etapa de la historia del pensamiento, a saber, la apropiación del objeto o segmento de la naturaleza por el sujeto perceptor. Los ilustrados alemanes conjugaban el método experimental con una reflexión sobre la idoneidad y limitación de ese recurso; con otras palabras: escribieron sobre física, o biología, y sobre teoría del conocimiento, a la par.

Fink ciñe su estudio al período que transcurre desde 1790 hasta 1810, cuando Goethe ha esbozado ya sus ideas centrales en torno a la geología, anatomía comparada, botánica y óptica. Ha trazado también su idea matriz, la de la unidad de la naturaleza, que no admite hiatos separadores entre los seres amorfos y los organismos.

Lo mismo que en Hutton, el gozne sobre el que descansa la geología goethiana es la formación del granito, componente principal de la corteza y constituido por feldespato, mica, cuarzo y, a veces, turmalina. Por ser la roca arquetípica, de su investigación, pensaba, saldría la luz que acabaría con el debate entre neptunistas y vulcanistas.

Su aportación a la anatomía comparada, otra fuente de controversia en su tiempo, se singulariza en la descripción de los huesos de la mandíbula superior del hombre. En breve: el hueso intermaxilar aparecía como un factor de conexión entre primates y humanos. Corroboraba ello la unidad profunda en la naturaleza. Por lo que respecta a la botánica, a la metamorfosis de las plantas desde la germinación de las semillas hasta la maduración del fruto, postuló que el proceso entero debía entenderse a través de la morfología de las hojas (de las embrionarias o cotiledones al pericarpio), que sufrían fases de contracción y expansión en el desarrollo de los órganos. Por último, sus escritos sobre los colores reflejan un conocimiento profundo de la óptica newtoniana y de la fisiología de la visión. (Este punto, motivo principal de la mayoría de las investigaciones sobre Goethe, ha sido abordado *in extenso* por Dennis L. Sepper en *Goethe contra Newton: Polemics and the Project for a New Science of Color.*) Como es de suponer, quien creó el alemán literario moderno dejó también su impronta en la exposición de los textos científicos. Algo dice de eso Fink y mucho se trasluce cuando introduce en el relato los términos originales. (L. A.)

Patrimonio

Recursos minerales

ELS MINERALS DE CATALUNYA. Josep M. Mata i Perelló. Institut d'Estudis Catalans. Arxius de la Secció de Ciències, XCIII. Barcelona, 1990.

El conocimiento de las fuentes de materiales no renovables y, en especial, de la riqueza mineral constituye una de las necesidades básicas para cualquier país, no sólo por su efecto inmediato, sino también por su valor potencial a largo plazo. El camino para lograr este conocimiento requiere poseer ante todo un catálogo, lo más exhaustivo posible, de las distintas especies minerales y la localización geográfica y geológica de los mismos.

La literatura científica de este tema pocas veces contiene obras de carácter general. Y así encontramos la clásica *Los Minerales de España* de Salvador Calderón que la Junta de Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas publicara en 1910, y en relación con la mineralogía de Cataluña la *Memoria* que la Institució Catalana d'Història Natural publicó en 1920, obra póstuma del mineralogista Llorenç Tomàs. Estas obras, clásicos en la literatura mineralógica española, han quedado sobrepasadas en la actualidad por el volumen de información que en el transcurso de cerca de tres cuartos de siglo se ha ido acumulando. Conscientes de la necesidad de una actualización de estos conocimientos, el Instituto Geológico y Minero de España publicaba en 1979 la obra de Emilio Galán Huertos y Salvador Mirete Mayo *Introducción a los Minerales de España*, que contiene la descripción de más de cuatrocientas especies minerales, con su localización geográfica y su naturaleza.

De concepción totalmente distinta es la obra que ahora comentamos. Mata nos presenta el resultado del reconocimiento por él mismo practicado en cerca de 1100 mineralizaciones. Los datos recogidos, la identificación de las especies minerales y otro conjunto de incidencias se presentan en la obra de manera organizada según las distintas demarcaciones dadas por la Generalidad de Cataluña en 1932. En total, las mineralizaciones se estudian agrupadas en las 39 comarcas allí establecidas. De esta manera la obra nos describe las mineralizaciones de las comarcas agrupadas en nueve regiones. Para cada región el autor describe los principales conjuntos mineralógicos que complementa con un mapa con las localizaciones minerales y relaciona además los distintos minerales estudiados, a la par que señala el lugar geográfico donde se encuentran. La obra se complementa con una descripción general de las principales mineralizaciones tratadas desde su entorno geológico, nuevamente agrupadas dentro de su contexto geográfico. Se incluyen índices que facilitan el acceso a la información contenida. Todo ello hace que el libro constituya una referencia obligada para cualquier especialista y coleccionista interesado en la mineralogía del Principado. Se echa en falta, no obstante, la bibliografía, que por lo extensa no ha sido publicada más que en forma muy reducida. (J. L. A.)

Apuntes

"Geometrizar la cooperación": quizá parezca una frase descabellada. Pero piénsese en un juego en el que cualquiera gana si engaña y todos pierden si lo hacen los demás también. Supongamos que hay quienes, pese a ello o por ello, según se mire, engañan por principio, y otros que siempre son leales; colóquense a estos jugadores en una red plana, de forma que cada uno juegue sólo con sus ocho vecinos y, en cada ronda, adopte la política del vecino que más provecho haya sacado en la anterior. Si representamos la situación en la pantalla de un ordenador mediante puntos de color, obtendremos bellas configuraciones espaciales, caóticas, cómo no.

Los inselbergs son montañas solitarias, monolíticas por lo común, que se yerguen de forma brusca sobre la llanura circundante en las regiones tropicales. Se han convertido en elementos característicos del paisaje de Africa occidental. Es reciente, sin embargo, el estudio sistemático de su cubierta vegetal y se ha comprobado que su flora difiere radicalmente de la vegetación adyacente. Constituyen, en ese sentido, modelos idóneos para determinados aspectos de la ecología insular. Presentan una disposición en mosaico ensamblada por múltiples hábitats, o islotes a su vez: roquedos con cobertura de líquenes y cianofíceas, canales de drenaje, vegetación de inundación temporal, tapiz de gramíneas y diversos tipos de bosque.

Einstein deploraba el postulado cuántico según el cual, a escala atómica, una propiedad no tiene en general un valor concreto hasta que no se la mide, y abogaba por una teoría "realista" en la que no fuese así. Hoy sabemos que ésta podría reproducir las predicciones cuánticas sólo si, como hace la misma mecánica cuántica, negase la mutua independencia de procesos físicos sin vínculo causal. Pues bien: se ha demostrado que, además, habría de ser incompatible con el principio de equivalencia de los sistemas de referencia. Es una paradoja histórica: quien quiera defender el realismo "einsteiniano" se verá obligado a rechazar los fundamentos mismos de la teoría de la relatividad.

A las convergencias de forma en la naturaleza, que la fotografía en color no tardó en popularizar, se las llamaba caprichos o curiosidades. Una de las coincidencias más notables es la que presentan las semillas del ricino y los huevos de insectos del orden de los Phasmatodea. A imagen de las semillas, los huevos se dotan de un "capitulum" ligado al opérculo por donde emerge la ninfa. Les va en ello la vida porque a los insectívoros, según parece, tampoco les gusta el aceite de ricino.

Para comprobar la fecundidad de ciertos descubrimientos basta a veces echar un rápido vistazo atrás. Hace ahora diez años se publicaba el primer trabajo sobre un nuevo segundo mensajero, el inositol (1, 4, 5)-trifosfato. De entonces acá, hemos conocido su lugar de síntesis y el proceso metabólico en que está implicado; merced a la clonación de su receptor, está saliendo a la luz el mecanismo en virtud del cual libera calcio celular. Más. El hallazgo reciente de que el síndrome oculocerebrorrenal de Loewe se debe a un gen defectuoso que determina una de las enzimas responsables de la formación de dicho mensajero no hace sino realzar el interés del metabolito.

La hipótesis de Beringia, de acuerdo con la cual la franja de terreno que unió durante el Pleistoceno final, hace entre 11.000 y 12.000 años, Asia y Alaska fue lugar de habitación de los paleoindios americanos, ha adquirido sólido respaldo con el desenterramiento de nuevos yacimientos. En particular, el de la cuenca de Tanana, donde se han hallado útiles humanos y restos abundantes de animales cazados: bisontes, alces y caribúes, cuyo análisis por carbono-14 los fechan en torno al 11.500 antes de la actualidad.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



INGENIERIA MECANICA DEL ISLAM OCCIDENTAL, por Juan Vernet

Los ingenieros musulmanes idearon mecanismos de lujo, algunos con rentable aplicación práctica, de los que podía disponer la aristocracia para su entretenimiento.

LOS AGUJEROS NEGROS Y LA PARADOJA DE LA FUERZA CENTRIFUGA, por Marek Artur Abramowicz

Un objeto que gire en la vecindad de un agujero negro experimenta una fuerza centrífuga que lo empuja hacia dentro. Este efecto paradójico tiene importantes implicaciones en astrofísica.

ADIESTRAMIENTO DEL SISTEMA INMUNITARIO EN LA LUCHA CONTRA EL CANCER, por Thierry Boon

Ciertas moléculas de los tumores pueden actuar como objetivos sobre los que dirigen su ataque células especiales del sistema inmunitario.

BOSQUES INUNDADOS DEL AMAZONAS, por Michael Goulding

Algunas partes de la inmensa selva son tanto ecosistemas acuáticos como ecosistemas terrestres. Unas adaptaciones únicas permiten a los individuos medrar en los bosques inundados.

AVANCES EN GENETICA MOLECULAR, por John Rennie

La biología molecular está creando un nuevo modelo genético en el que aparecen genes saltadores, genes aditivos e incluso proteínas determinadas por genes fantasma.

LAS LAMPARAS DE LA EDAD DE HIELO, por Sophie A. de Beaune y Randall White

La humanidad arcaica obtuvo calor y protección frente a los predadores cuando aprendió a controlar el fuego, hace 500.000 años. Otra innovación no menos importante ocurrió hace sólo 40.000: el invento de lámparas portátiles.

PANTALLAS PLANAS, por Steven W. Depp y Webster E. Howard

Los avances más recientes de la microelectrónica y de los cristales líquidos permiten fabricar pantallas de vídeo que se pueden colgar de una pared o llevar como un reloj en la muñeca.

COMO ENCUENTRAN A SUS PATRONES LAS AVISPAS PARASITAS, por James H. Tumlinson, W. Joe Lewis y Louise E. M. Vet

Además de reconocer los olores procedentes de las orugas que son sus patrones, las avispas aprenden a identificar compuestos liberados por la planta de que se alimentan las orugas.

